

EDUCACIÓN en FÍSICA

Revista de la Asociación de Profesores de Física del Uruguay

EDICIÓN DIGITAL - ISSN: 3121-2239

Número 40 - setiembre, 2026



Fotografía de lanzamiento Artemis II (crédito: Fefo Bouvier)

Imagen de la superficie lunar: NASA / misión Artemis II



Revista Educación en Física

Número 40 – setiembre 2026

Equipo editorial:

Caracé Gutiérrez
Agustín Machado
María José Parrado
Álvaro Suárez

Comisión asesora:

Marcela Ballesta
Fernando Fontán
Alejandro Parrella
Carolina Pereira
Marcelo Vachetta

Revisor de estilo:

Guzmán Trinidad

Editor en jefe:

Ismael Núñez

Comisión directiva de la APFU

Brian Guzmán, *presidente*
Daniel Baccino, *vicepresidente*
Victoria Batista, *secretaria*
Marco Pereira, *tesorero*
Raquel Pesce, *vocal*



Imagen de portada:

Fefo Bouvier (2026) *Fotografía de lanzamiento Artemis II*. Reproducida con autorización del autor.

Invitación a enviar sus artículos:

Queridas/os lectoras/es, anímense a escribir y enviar sus artículos. La revista siempre recibirá sus aportes. Ante cualquier duda pueden contactarse a través del email: apfurevistacientifica@gmail.com, donde responderemos todas sus consultas e inquietudes.

A su vez, nuestra página web cuenta con una sección específica para las/os autoras/es donde pueden encontrar aspectos pertinentes como *líneas orientadoras* y el *formulario de envío de artículos* que cuenta con una *plantilla rellenable*.

🔗 [Aquí puedes acceder a la sección “para los autores”.](#)

¡Muchas gracias! Estamos esperando tu artículo.

Artículos en este número:

Simetrías y leyes de conservación: una mirada conceptual.

Charbonnier, M. _____ 2

IA generativa en la enseñanza de la Física: cómo integrarla sin reemplazar el razonamiento.

Pombo, B. _____ 14

La primera pila y la rana que la parió.

Almeida, B. _____ 26

Sobre hombros de gigantes: Graciela Scavone, una vida de compromiso con la enseñanza de la Física.

Casais, F.; Trinidad, G. _____ 33

Estudio experimental del movimiento individual y la dinámica colectiva de hormigas en confinamiento.

Gutiérrez, L.; Nieves, N.; Gutiérrez, C. _____ 43

Gráficas de posición en función del tiempo para estudiantes no videntes: una propuesta didáctica inclusiva desde diagrama de puntos.

Aparaín, S. _____ 52



Simetrías y leyes de conservación: una mirada conceptual.



Mathias Charbonnier ^{1, 2}

¹ Instituto de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

² Instituto de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

E-mail: mchabonnier@fing.edu.uy

(Recibido el 10/11/2025, aceptado el 16/3/2026)

Resumen

El presente artículo se basa en la conferencia titulada *Las reglas del juego que nadie escribió (pero todos seguimos)* presentada en el encuentro de la *Asociación de Profesores de Física del Uruguay (APFU)* y tiene como objetivo ofrecer una exposición conceptual y accesible de la relación entre las transformaciones de simetría definidas en una teoría física y las leyes de conservación en la naturaleza. En el marco de la mecánica lagrangiana, se muestra cómo la conservación de magnitudes como la energía, el momento lineal y el momento angular pueden interpretarse como consecuencia directa de determinadas simetrías espaciales y temporales. Para ello se analizan ejemplos simples correspondientes a las simetrías de traslación espacial, rotación y traslación temporal, asociadas respectivamente con la conservación de la cantidad de movimiento, el momento angular y la energía mecánica. Finalmente, se discute brevemente la relevancia de estos principios en teorías físicas más generales, donde el papel de las simetrías adquiere un carácter fundamental.

Palabras clave: Simetrías, Conservación, Noether, Lagrangiano, Principio de mínima acción.

Abstract

This article is based on the conference entitled *The rules of the game that nobody wrote (but we all follow)* presented at the meeting of the *Asociación de Profesores de Física del Uruguay (APFU)* and aims to offer a conceptual and accessible exposition of the relationship between the symmetry transformations defined in a physical theory and the conservation laws in nature. Within the framework of Lagrangian mechanics, it is shown how the conservation of quantities such as energy, linear momentum, and angular momentum can be interpreted as a direct consequence of certain spatial and temporal symmetries. To this end, simple examples corresponding to spatial translation, rotation, and time translation symmetries are analyzed, associated respectively with the conservation of linear momentum, angular momentum, and mechanical energy. Finally, the relevance of these principles in more general physical theories is briefly discussed, where the role of symmetries acquires a fundamental character.

Keywords: Symmetries; Conservation; Noether; Lagrangian; Principle of least action

1. Introducción

El presente trabajo propone una introducción conceptual y visual a uno de los principios más profundos de la física, la relación entre simetrías y leyes de conservación. El objetivo es presentar las ideas de manera accesible y sugerente, con el fin de ofrecer una visión de la física más unificadora y universal. Si bien el enfoque general se mantiene en un nivel conceptual, sobre el final del trabajo se incluyen dos capítulos destinados a desarrollar un tratamiento matemático más riguroso, el cual amplía las ideas discutidas previamente y brinda una continuidad natural para quienes deseen un nivel de análisis más profundo.

Comenzaremos en el capítulo 2 explorando el concepto de simetría, diferenciando entre simetrías discretas y continuas. A través de ejemplos sencillos como la rotación de un polígono regular (*simetría discreta*) y la traslación vertical de una función lineal (*simetría continua*), se establecerá la idea de que ciertos objetos o leyes pueden permanecer invariantes ante transformaciones. Asimismo, se verá que dichas transformaciones de simetría presentan ciertas propiedades que pueden organizarse dentro de una estructura matemática más general, conocida como *grupo*. Esta noción se trasladará luego al ámbito de las leyes físicas, y veremos que muchas de estas leyes que usamos cotidianamente no cambian cuando se aplican ciertas transformaciones del *espacio-tiempo*. En el capítulo 3, se analizarán tres ejemplos fundamentales de cómo las simetrías continuas están asociadas a cantidades conservadas:

- Invariancia bajo traslaciones en el espacio implica conservación del momento lineal.
- Invariancia bajo rotaciones implica conservación del momento angular.
- Invariancia bajo traslaciones en el tiempo implica conservación de la energía.

El objetivo principal es abordar estos ejemplos de manera visual y mediante situaciones familiares. En el capítulo 4 se presentará el *teorema de Noether* de forma cualitativa. Dicho teorema establece una conexión profunda entre ciertas simetrías de un sistema físico y las cantidades conservadas asociadas al mismo. Además, constituye una de las ideas más valiosas y unificadoras de la física del siglo XX. Se enfatizará que no se trata de una coincidencia, sino de una consecuencia matemática del formalismo con el que se formulan las teorías físicas. Para conectar estas observaciones con una base más rigurosa, se introducirá en el capítulo 5 de manera breve el formalismo *lagrangiano*. Se explicará que, en el contexto clásico, los sistemas pueden representarse a través de una función

llamada lagrangiano, que depende de las posiciones y velocidades del sistema. Esta función permite aplicar un principio poderoso, el *principio de mínima acción*, según el cual la naturaleza "elige" trayectorias que minimizan cierta cantidad escalar, la acción. Se destacará que este principio unifica una enorme cantidad de fenómenos físicos y es una herramienta conceptual central en física moderna.

Como cierre conceptual, se señalará que, aunque los ejemplos desarrollados a lo largo del artículo se enmarcan en la física clásica, el papel de las simetrías se vuelve aún más central en teorías modernas. Sin entrar en detalles técnicos, se mencionará muy brevemente que la física contemporánea no solo sigue utilizando el teorema de Noether, sino que lo ha elevado al nivel de principio orientador en la búsqueda de nuevas teorías. En muchos casos, las simetrías no solo son una propiedad deseable, sino que son un requisito a la hora de construir modelos físicos coherentes.

2. Simetrías como algo cotidiano

De alguna forma, todos estamos familiarizados con el concepto de simetría. Ya sea desde lo cotidiano o lo académico, todos coincidimos en que, siempre que se habla de simetría hay algo que se mantiene, algo es igual. Para los griegos, la simetría significaba algo equilibrado y bien proporcionado. Era una idea que significaba perfección. En su contexto geométrico, la simetría se asociaba con la conmensurabilidad [1]. También implicaba una regularidad de forma, y la relación exhibida entre las diferentes partes de un todo. Para ellos, las simetrías de la naturaleza deberían reflejarse directamente en el movimiento de los objetos, las estrellas y planetas deben moverse en círculos porque esas son las trayectorias más simétricas. Por supuesto, los planetas no lo hacen, y esa no fue la última vez que intuiciones ingenuas sobre las simetrías se encontraron con problemas en el experimento. Como señala el matemático alemán Hermann Weyl: "en la medida en que puedo verlo, todas las afirmaciones *a priori* de la física tienen su origen en la simetría" [2]. Las simetrías se manifiestan en las ecuaciones de movimiento en lugar de en soluciones particulares a esas ecuaciones. La ley de gravitación universal de Newton, por ejemplo, exhibe simetría esférica (la fuerza es la misma en todas las direcciones), y, sin embargo, las órbitas planetarias son elípticas. Como vemos, en física la intuición o ciertos principios generales a menudo sugieren la presencia de simetrías en un problema, y su explotación sistemática puede convertirse en una herramienta extremadamente poderosa. Esto nos lleva a la pregunta: ¿cómo entendemos las simetrías en física? Diremos que una simetría es una transformación

que puede realizarse (al menos conceptualmente) sobre un sistema y que lo deja invariante; es decir, lo lleva a una configuración indistinguible de la original [3]. Para visualizar esta idea analicemos el sistema de la Figura 1.

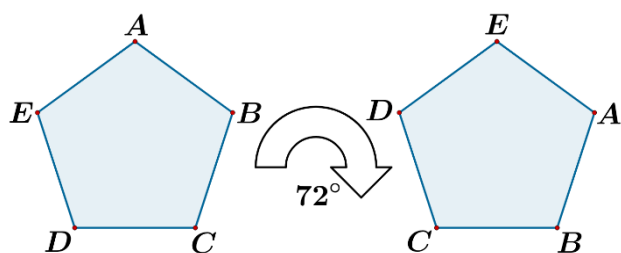


Figura 1. Rotación de 72° de un pentágono regular, ilustrando una simetría discreta del mismo.

Si consideramos al pentágono como nuestro sistema y etiquetamos sus vértices, veremos que una rotación en este caso de 72° permite obtener una configuración idéntica a la inicial. De hecho, cualquier rotación cuyo ángulo sea un múltiplo entero de este valor será una simetría de este sistema. A este tipo de simetrías se las conoce como *simetrías discretas* ya que están parametrizadas por conjunto discreto de valores, es decir, podremos rotar $n \times 72^\circ$ con $n \in \mathbb{Z}$ veces, pero no por ejemplo $n = 2.5$, ya que no obtendríamos el mismo sistema.

Observemos que la situación anterior satisface algunas propiedades deseables a la hora de pensar las simetrías como transformaciones de un sistema. Si denotamos por $R(n, 72^\circ)$ a la transformación de simetría que toma el sistema anterior y lo rota $n \in \mathbb{Z}$ veces 72° , donde entendemos que $n < 0$ es una rotación en sentido contrario, entonces:

1. Aplicar $R(n, 72^\circ)$ y luego aplicar $R(m, 72^\circ)$ es lo mismo que aplicar $R(n + m, 72^\circ)$.
2. Siempre que aplicamos $R(n, 72^\circ)$ podemos aplicar $R(-n, 72^\circ)$ y eso vuelve el sistema al estado inicial.
3. $R(0, 72^\circ)$ deja al sistema en el estado inicial.

La propiedad (1) nos dice que dadas dos transformaciones de simetría del sistema puedo crear una nueva transformación (que también es una simetría) en base a las anteriores definiendo esta como la composición. La propiedad (2) establece que dada una transformación de simetría es posible encontrar una transformación inversa que vuelve el sistema a su estado inicial. Finalmente, la propiedad (3) nos dice que existe una transformación de simetría trivial que consiste en dejar al sistema en su estado inicial.

Antes de enunciar una definición general sobre estas transformaciones, veamos otro ejemplo de simetría que resulta fundamental en el estudio de

sistemas físicos.

Consideremos el sistema representado en la Figura 2, donde se muestran en un mismo plano las funciones polinómicas de primer grado $f, g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, definidas como $f(x) = 2x$ y $g(x) = 2x + d$, donde d es una constante real. Podemos interpretar el paso de f a g como una traslación vertical del gráfico de la función original. Esta transformación no modifica la forma de la recta, sino que simplemente la desplaza a lo largo del eje y . En particular, observamos que la pendiente, que caracteriza la razón de cambio de la función, permanece invariante y conserva el mismo valor, 2, en ambos casos.

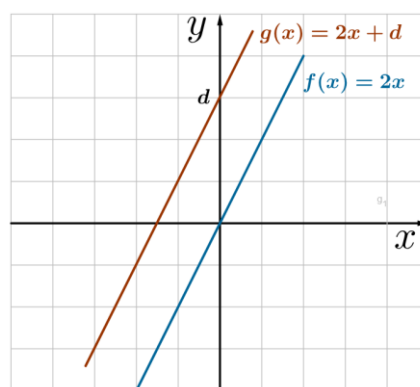


Figura 2. Traslación vertical de un gráfico lineal que deja invariante la pendiente ilustrando una simetría continua.

A este segundo tipo de simetría se le conoce como simetría continua, ya que ahora el parámetro de traslación puede ser cualquier número real y, sin embargo, la pendiente no cambiará. Nuevamente, si denotamos por $T(d)$ con $d \in \mathbb{R}$ a la traslación por d de la función f , tenemos que se satisface:

1. Aplicar $T(d)$ y luego aplicar $T(h)$ es lo mismo que aplicar $T(d + h)$.
2. Siempre que aplicamos $T(d)$ podemos aplicar $T(-d)$ y eso vuelve el sistema al estado inicial.
3. $T(0)$ deja al sistema en el estado inicial.

La estructura anterior junto con la del primer ejemplo es en realidad una estructura matemática mucho más general denominada *grupo* y resulta ser que el conjunto de todas las simetrías de un sistema cumple las propiedades algebraicas del mismo, es decir, si denominamos F al conjunto de todas las simetrías de un mismo sistema y definimos la operación $*$ en F como la operación de composición entre sus elementos, entonces se satisface que [4]:

1. **Clausura:** Si $f, g \in F$ entonces $f * g \in F$.
2. **Identidad:** Existe $I \in F$ tal que $I * f = f * I = f$ para todo $f \in F$.

3. **Inverso:** Para todo $f \in F$ existe $f^{-1} \in F$ tal que $f * f^{-1} = f^{-1} * f = I$.
4. **Asociatividad:** $f * (g * h) = (f * g) * h$ para todo $f, g, h \in F$.¹

Una observación importante es que no es necesario que los elementos de un grupo² conmuten entre sí, en tal caso el grupo se denomina *abeliano* o *conmutativo*. Como ejemplo de esto último, si trabajamos en el espacio euclídeo de 3 dimensiones, las traslaciones en el mismo forman un grupo abeliano mientras que las rotaciones no.

3. Simetría y conservación (I)

Hasta ahora nos hemos dedicado a tratar de entender qué es una simetría, cómo podemos definirla y visualizar algunas de sus propiedades. En este capítulo nos proponemos dar una noción de cómo es que aparecen en sistemas físicos y por qué su presencia es de suma importancia cuando uno quiere trabajar con sistemas más complejos.

Comencemos analizando un sistema clásico sencillo, el movimiento de un proyectil, representado en la Figura 3. Se trata de un ejemplo idealizado en el que un cuerpo se mueve bajo la acción de la gravedad, despreciando la resistencia del aire.

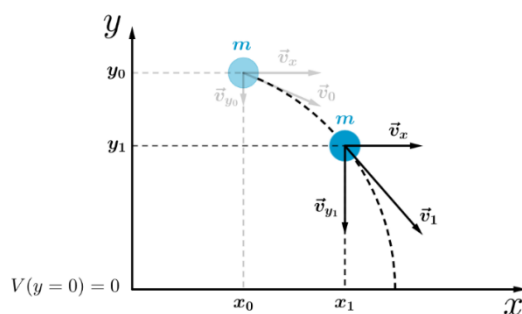


Figura 3. Trayectoria parabólica de un proyectil: movimiento uniforme en x y acelerado en y .

Como es habitual en el análisis de este tipo de movimiento, el proyectil presenta un movimiento uniforme en la dirección horizontal y un movimiento uniformemente acelerado en la dirección vertical. En consecuencia, el momento lineal horizontal $\vec{p}_x = m\vec{v}_x$ se mantiene constante a lo largo de toda la trayectoria, mientras que el momento lineal vertical $\vec{p}_y = m\vec{v}_y$ varía con el tiempo debido a la acción de la gravedad sobre la componente vertical de la velocidad.

¹ Aunque resulta menos evidente de visualizar en los ejemplos de las Figuras 1 y 2, la propiedad asociativa también se cumple en ambos casos.

Analicemos ahora qué ocurre cuando aplicamos una traslación horizontal a este sistema. Consideremos el proyectil situado inicialmente en una posición fija (x_0, y_0) y trasladémoslo una distancia d a lo largo del eje x . En términos de coordenadas, esto equivale a realizar la transformación

$$x_0 \rightarrow x'_0 = x_0 + d. \quad (\text{Ec. 1})$$

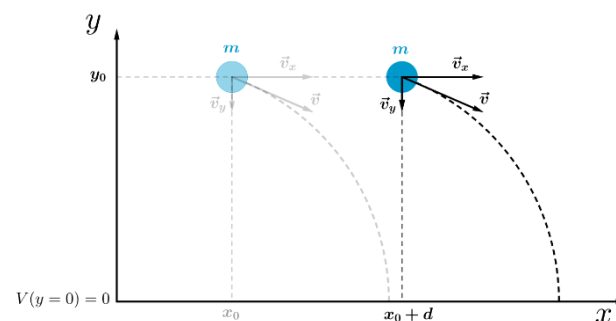


FIGURA 4. Traslación horizontal del sistema, el movimiento parabólico se representa en dos posiciones que difieren en una distancia d sobre el eje x . Dado que la traslación ocurre dentro de una equipotencial el sistema es invariante bajo esta transformación.

Como se ilustra en la Figura 4, este desplazamiento no modifica ni la forma de la trayectoria ni la acción del campo gravitatorio sobre el proyectil. Observemos, además, que esta transformación constituye una simetría respecto de la energía, pues dado que la energía potencial gravitatoria presenta equipotenciales horizontales, la energía tanto antes como después de la traslación es

$$E = \frac{1}{2}m(v_x^2 + v_{y_0}^2) + mgy_0. \quad (\text{Ec. 2})$$

En cambio, si realizamos una traslación vertical del sistema, de modo que $y_0 \rightarrow y'_0 = y_0 + d$, como se muestra en la Figura 5, observamos que la energía potencial del proyectil sí se ve modificada. En este caso, la configuración resultante no es indistinguible de la original, ya que el valor del potencial gravitatorio cambia con la altura. La energía del sistema después de la traslación vertical está dada por

$$E = \frac{1}{2}m(v_x^2 + v_{y_0}^2) + mg(y_0 + d). \quad (\text{Ec. 3})$$

Por lo tanto, la traslación vertical no constituye una simetría del sistema.

² Las simetrías en nuestro caso.

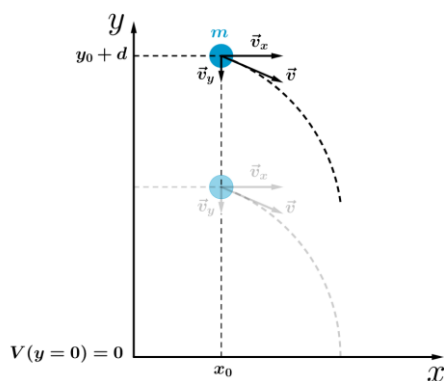


Figura 5. Traslación vertical del sistema, el movimiento parabólico se desplaza una distancia d en el eje y . Dado que la energía potencial del sistema cambia con la altura, el sistema no es invariante bajo esta transformación.

Hemos encontrado, entonces, un paralelismo notable. En aquellas direcciones del espacio donde el sistema presenta simetría bajo traslaciones, existe una cantidad conservada: el momento lineal. En cambio, en las direcciones donde dicha simetría no está presente, esa cantidad deja de conservarse.

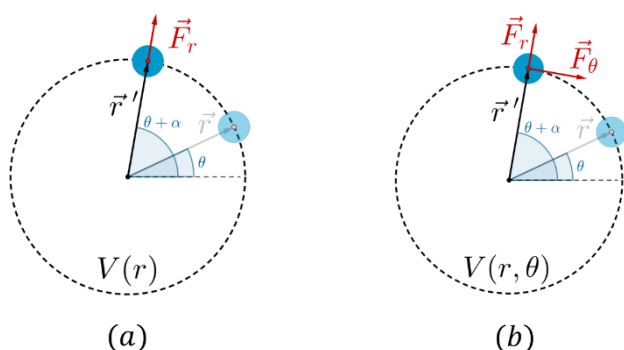


Figura 6. (a) Potencial central isotrópico: la fuerza sobre la partícula depende solo de la distancia al centro y apunta en dirección radial, conservando el momento angular. (b) Potencial anisotrópico: la fuerza depende tanto de la distancia como del ángulo, presentando componentes tangenciales que generan torques y rompen la conservación del momento angular.

Antes de enunciar la ley general que relaciona estas observaciones, consideremos un segundo ejemplo. Analicemos el caso del movimiento de una partícula bajo la acción de dos potenciales centrales distintos, uno isotrópico y otro anisotrópico. El primer caso, Figura 6a, corresponde a un potencial central isotrópico, como ocurre por ejemplo en la interacción gravitatoria o en la interacción electrostática de *Coulomb*. La fuerza que actúa sobre la partícula depende únicamente de la distancia al centro y apunta siempre en dirección radial. Esto implica que, si

realizamos una transformación de rotación $\theta \rightarrow \theta' = \theta + \alpha$ alrededor del origen, la configuración resultante es indistinguible de la original, el sistema es, por lo tanto, invariante bajo rotaciones. Además, en este tipo de sistemas el momento angular $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$ se conserva en el tiempo, resultado que se obtiene a partir de las ecuaciones de movimiento para fuerzas centrales [5].

En cambio, en el segundo caso, Figura 6b, si la partícula se encuentra sometida a un potencial anisotrópico, este rompe la simetría anterior, ya que ahora depende tanto de la distancia como de la dirección respecto del origen. En esta situación el sistema deja de ser invariante bajo rotaciones. La fuerza puede obtenerse a partir del potencial mediante

$$\vec{F} = -\nabla U \quad (\text{Ec. 4})$$

que en coordenadas polares planas toma la forma

$$\vec{F} = -\frac{\partial U}{\partial r} \hat{e}_r - \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \hat{e}_\theta. \quad (\text{Ec. 5})$$

El hecho de que el segundo término del lado derecho de la ecuación (5) sea distinto de cero implica que la fuerza adquiere componentes tangenciales que generan torques no nulos. Como consecuencia, el momento angular deja de conservarse.

Este contraste entre ambos escenarios ilustra nuevamente la idea central de que la presencia o ausencia de una simetría determina la existencia o la ruptura de una cantidad conservada.

Por último, presentemos un ejemplo que permite ilustrar la relación entre otra simetría y la conservación de una cantidad fundamental en los sistemas mecánicos. Consideremos una partícula de masa m unida a un resorte ideal de constante elástica k , que puede moverse sin rozamiento a lo largo de una dimensión, como se muestra en la Figura 7.

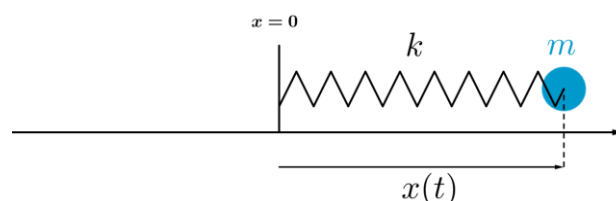


Figura 7. Oscilador armónico unidimensional formado por una partícula de masa m unida a un resorte ideal de constante elástica k . La coordenada $x(t)$ indica el desplazamiento respecto de la posición de equilibrio.

En este caso, la partícula está sometida a un potencial de la forma

$$U(x) = \frac{1}{2} kx^2, \quad (\text{Ec. 6})$$

donde x representa el desplazamiento de la partícula respecto de la posición de equilibrio. La energía mecánica del sistema puede escribirse entonces como

$$E = \frac{1}{2} m\dot{x}^2 + \frac{1}{2} kx^2. \quad (\text{Ec. 7})$$

Puede observarse que esta expresión no depende explícitamente de la variable temporal. Esto implica que las ecuaciones que describen el movimiento del sistema mantienen la misma forma independientemente del instante en que se considere el experimento. Aunque la posición de la partícula $x(t)$ evoluciona con el tiempo, las leyes que describen su dinámica no distinguen entre distintos instantes. En otras palabras, el sistema es invariante bajo traslaciones temporales, es decir, su descripción no cambia si se desplaza el tiempo $t \rightarrow t + \Delta t$. En este contexto, se satisface además que la energía del sistema permanece constante durante su evolución. Este ejemplo ilustra nuevamente cómo la presencia de una simetría en la descripción del sistema se refleja en la existencia de una cantidad conservada.

A continuación, presentamos el teorema que formaliza estas ideas y establece la relación general entre simetrías y leyes de conservación.

4. Teorema de Noether

Estamos ahora listos para enunciar uno de los resultados más célebres de la física del siglo XX. Su autora fue la matemática alemana Emmy Noether (1882–1935), quien realizó aportes fundamentales tanto en álgebra abstracta como en física teórica. Durante las décadas de 1910 y 1920 trabajó en la Universidad de Göttingen, donde, en colaboración con figuras como Hilbert y Klein, formuló un resultado que transformó nuestra comprensión del vínculo entre las simetrías y las leyes de conservación [6].

En términos sencillos, el Teorema de Noether establece que [7]:

“A cada simetría continua del espacio-tiempo le corresponde una ley de conservación, y cada ley de conservación refleja una simetría subyacente”

Este principio unifica en una sola idea los ejemplos que hemos visto. La simetría traslacional se

asocia con la conservación del momento lineal, la simetría rotacional con la conservación del momento angular y la simetría de traslación temporal con la conservación de la energía mecánica. El teorema de Noether no solo proporciona una herramienta conceptual poderosa, sino que también revela una estructura profunda y universal en las leyes de la física.

El objetivo de los próximos capítulos será introducir un formalismo algo más exigente desde el punto de vista matemático que nos permita demostrar los resultados que en los apartados anteriores solamente nos limitamos a presentar desde un enfoque más conceptual. Si bien los detalles matemáticos no son indispensables para la comprensión de las ideas principales del trabajo, su lectura permite profundizar y aportar un punto de vista más riguroso.

5. Formalismo lagrangiano y principio de mínima acción

La *mecánica lagrangiana* constituye una reformulación elegante y conceptualmente poderosa de la mecánica newtoniana. Aunque ambas teorías son equivalentes en su contenido físico, el enfoque *lagrangiano* ofrece una mayor flexibilidad para el tratamiento de sistemas con múltiples grados de libertad y resulta especialmente adecuado para generalizaciones posteriores, como la electrodinámica o teorías de campos.

El punto de partida de este formalismo es el principio de mínima acción. Según este principio, la evolución de un sistema físico entre dos instantes dados está determinada por aquella trayectoria que hace extremal (típicamente mínima) una cierta cantidad escalar denominada acción la cual denotamos por la letra S . Desde el punto de vista matemático, este principio se enmarca en el cálculo variacional. En el apéndice **A** se presenta una breve introducción a esta herramienta, suficiente para comprender el origen de las ecuaciones que utilizaremos. En lo que sigue, tomaremos como punto de partida el resultado fundamental de dicho formalismo.

Antes de continuar, conviene introducir el concepto de coordenadas generalizadas. En un sistema mecánico, el número de grados de libertad corresponde al número mínimo de parámetros independientes necesarios para describir completamente su configuración. Por ejemplo, una partícula libre en el espacio posee tres grados de libertad, ya que su posición queda determinada mediante tres coordenadas. En el formalismo lagrangiano se denominan coordenadas generalizadas a cualquier conjunto de variables $q_1, q_2, \dots, q_s$ que permita especificar de manera única la configuración del sistema, donde s es el número de

grados de libertad. Estas coordenadas no tienen por qué ser necesariamente cartesianas, pueden ser también coordenadas angulares, distancias u otras variables que resulten más convenientes para describir el problema. Por ejemplo, para una partícula en el espacio tridimensional se pueden elegir distintos conjuntos de coordenadas generalizadas como (x, y, z) en coordenadas cartesianas, (r, ϕ, z) en coordenadas cilíndricas o (r, θ, ϕ) en coordenadas esféricas. En lo que sigue utilizaremos la notación general q_i para mantener el formalismo lo más general posible.

Consideremos ahora el caso de una partícula cuya posición puede describirse mediante tres coordenadas q_1, q_2, q_3 , y que se mueve bajo la acción de fuerzas conservativas. Para simplificar la notación trabajaremos con este caso, aunque el procedimiento es completamente generalizable a sistemas con múltiples partículas y grados de libertad. Si T denota la energía cinética de la partícula y U su energía potencial, podemos definir un vector de coordenadas generalizadas como $q = (q_1, q_2, q_3)$ y un vector de velocidades generalizadas $\dot{q} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3)$. Con esta notación, el funcional de acción se define como

$$S = \int_{t_1}^{t_2} dt L(t, q(t), \dot{q}(t)), \quad (\text{Ec. 8})$$

donde

$$L(t, q(t), \dot{q}(t)) \equiv T(t, q(t), \dot{q}(t)) - U(t, q(t)) \quad (\text{Ec. 9})$$

es el lagrangiano del sistema. La acción S es un número asociado a cada trayectoria del sistema que conecta dos configuraciones en dos instantes de tiempo $t_1 < t_2$ con condiciones de borde

$$q_i(t_1) = q_i^{(1)}, \quad q_i(t_2) = q_i^{(2)}, \quad i = 1, 2, 3 \quad (\text{Ec. 10})$$

donde tanto $q_i^{(1)}$ como $q_i^{(2)}$ son constantes para cada valor de i . El principio de mínima acción establece que, entre todas las trayectorias posibles que puede seguir un sistema, este elige aquella que hace extremal (típicamente mínima) la acción S [7]. El resultado fundamental del cálculo variacional (presentado en el apéndice A) implica que dicha trayectoria debe satisfacer las ecuaciones³

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0, \quad (\text{Ec. 11})$$

conocidas como *ecuaciones de Euler-Lagrange* para el sistema.

³ Una para cada coordenada generalizada q_i .

Como ejemplo de que estas ecuaciones son equivalentes a las de Newton, consideremos nuevamente el oscilador armónico unidimensional de la Figura 7. Tenemos una única partícula de masa m confinada a moverse en el extremo de un resorte de constante elástica k y en el cual consideraremos que su longitud de equilibrio es nula para simplificar los cálculos. En tal caso, el lagrangiano es

$$L = T - U = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 - \frac{1}{2} k x^2. \quad (\text{Ec. 12})$$

Y la ecuación de Euler-Lagrange asociada a la coordenada x nos da

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = \frac{d}{dt} (m \dot{x}) = m \ddot{x}, \quad \frac{\partial L}{\partial x} = -kx, \quad (\text{Ec. 13})$$

obteniendo

$$m \ddot{x} + kx = 0. \quad (\text{Ec. 14})$$

Que coincide con el resultado clásico obtenido a partir de las leyes de Newton.

Obsérvese que, si bien desde el punto de vista matemático el procedimiento puede resultar algo más laborioso, se arriba al mismo resultado mediante un análisis puramente escalar, sin necesidad de introducir vectores ni direcciones explícitas para la fuerza elástica. Esta es justamente una de las razones por las cuales estos métodos resultan ser altamente eficaces en el análisis de sistemas más complejos.

6. Simetría y conservación (II)

En el capítulo anterior presentamos un formalismo matemático que constituye una reformulación de las leyes de Newton para el caso de sistemas sometidos a fuerzas conservativas. En lo que sigue, mostraremos que las simetrías de un sistema físico están directamente relacionadas con las invariancias del lagrangiano que lo describe.

6.1. Simetría e invariancia

Supongamos que nuestro lagrangiano es invariante bajo la traslación de una de sus coordenadas generalizadas. Es decir,

$$L(t, q_1, q_2, q_3, \dot{q}) = L(t, q_1, q_2 + c, q_3, \dot{q}) \quad (\text{Ec. 15})$$

donde c es una constante.

Esta condición implica que el lagrangiano L no depende explícitamente de la coordenada q_2 y, por lo tanto

$$\frac{\partial L}{\partial q_2} = 0 \quad (\text{Ec. 16})$$

A partir de las ecuaciones de Euler-Lagrange deducimos que

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right) = 0 \rightarrow p_2 = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} = \text{Constante} \quad (\text{Ec. 17})$$

En consecuencia, siempre que un sistema posea una simetría asociada en alguna de sus coordenadas generalizadas, de modo que dicha transformación lo deje indistinguible de su estado inicial, existirá una cantidad conservada asociada a esa simetría. Esta cantidad suele denominarse momento generalizado p_2 .

6.2. Simetría traslacional

Retomemos ahora el ejemplo inicial del capítulo 3. En dicho caso pusimos de manifiesto un paralelismo entre la presencia de una simetría espacial y la conservación del momento lineal. Observamos que, en las direcciones donde el sistema presentaba invariancia bajo traslaciones, el momento se conservaba, mientras que en aquellas donde no existía tal simetría, dicha conservación dejaba de cumplirse. En lo que sigue presentaremos una demostración formal de dicho resultado, utilizando el formalismo lagrangiano presentado en la sección anterior.

Para ello, veamos que el lagrangiano para esta situación está dado por

$$L = T - U = \frac{1}{2}m(v_x^2 + v_y^2) - mgy. \quad (\text{Ec. 18})$$

En base a lo discutido en la sección anterior, observamos que este lagrangiano no depende explícitamente de la coordenada espacial x . Por lo tanto, por las ecuaciones de Euler-Lagrange

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) = 0 \rightarrow p_x = \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} = m\dot{x} = \text{Constante} \quad (\text{Ec. 19})$$

Lo cual reproduce la conservación del momento lineal en la dirección horizontal.

De igual forma, puesto que en este caso el lagrangiano sí depende explícitamente de la coordenada y , se tiene que la derivada del mismo respecto de esta variable es distinta de 0 ($\partial_y L \neq 0$). En consecuencia, no podemos obtener una ley de

conservación para el momento en dicha dirección. Sin embargo, observemos que la ecuación de Euler-Lagrange para esta coordenada nos conduce a la ecuación de movimiento obtenida a partir de la segunda ley de Newton

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{y}} \right) = -mg \rightarrow \ddot{y} = -g. \quad (\text{Ec. 20})$$

6.3. Simetría Rotacional

De manera análoga, retomemos ahora el segundo ejemplo del capítulo 3, en el cual argumentamos que, bajo un potencial central isotrópico, el sistema presenta una simetría rotacional y, en consecuencia, posee una cantidad conservada, el momento angular. En cambio, para un potencial anisotrópico, que depende explícitamente del ángulo θ , dicha simetría se rompe y el momento angular deja de conservarse. En lo que sigue, presentaremos una demostración formal de este resultado, completamente análoga a la realizada para el caso de las traslaciones espaciales.

Para el potencial isotrópico, el lagrangiano en coordenadas polares planas toma la forma

$$L = T - U = \frac{1}{2}m(\dot{r}^2 + r^2\dot{\theta}^2) - U(r). \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde $U(r)$ puede representar cualquier potencial esféricamente simétrico, como los asociados a la interacción electrostática de Coulomb o a la ley de gravitación universal de Newton. Observemos que, nuevamente al no existir una dependencia explícita del ángulo θ se cumple que $\partial_\theta L = 0$ y por lo tanto la ecuación de Euler-Lagrange asociada a la coordenada generalizada θ conduce a

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = 0 \rightarrow L = \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = mr^2\dot{\theta} = \text{cte} \quad (\text{Ec. 22})$$

Esta cantidad corresponde precisamente al módulo del momento angular para este problema, pues

$$\begin{aligned} \vec{L} &= \vec{r} \times \vec{p} = m\vec{r} \times (\dot{r}\hat{e}_r + r\dot{\theta}\hat{e}_\theta) \\ &= mr^2\dot{\theta} \hat{e}_r \times \hat{e}_\theta. \end{aligned} \quad (\text{Ec. 23})$$

En consecuencia, la invariancia del sistema (y, por lo tanto, también de su lagrangiano) bajo rotaciones implica la conservación del momento angular.

Por otra parte, si el potencial ahora presenta una dependencia explícita con θ , es decir $U = U(r, \theta)$, el momento angular ya no será conservado. En este caso, la ecuación de Euler-Lagrange asociada a la

coordenada generalizada θ dará lugar a

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = \frac{\partial L}{\partial \theta} \rightarrow mr^2 \ddot{\theta} = -\frac{\partial U(r, \theta)}{\partial \theta}, \quad (\text{Ec. 24})$$

que corresponde con la segunda cardinal para este sistema. Ya que el término del lado derecho representa el torque que actúa sobre la partícula, pues

$$\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{F} = -\vec{r} \times \nabla U, \quad (\text{Ec. 25})$$

y utilizando la ecuación (5) y el hecho de que $\vec{r} = r\hat{e}_r$, tenemos que

$$\vec{\tau} = -r\hat{e}_r \times \left(\frac{\partial U}{\partial r} \hat{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} \hat{e}_\theta \right), \quad (\text{Ec. 26})$$

obteniendo

$$\vec{\tau} = -\frac{\partial U}{\partial \theta} \hat{e}_r \times \hat{e}_\theta. \quad (\text{Ec. 27})$$

6.4. Simetría Temporal

Hasta ahora nos hemos concentrado en dos magnitudes clásicas fundamentales, el momento lineal y el momento angular, ambas asociadas a simetrías espaciales. Sin embargo, existe una tercera cantidad aún más universal en la física clásica, la energía mecánica del sistema. Al igual que las anteriores, también puede interpretarse como el resultado de una simetría subyacente y veremos que se corresponde con una simetría temporal. Gracias al formalismo lagrangiano desarrollado, podremos demostrar de forma sencilla bajo qué condiciones esta cantidad permanece conservada.

Nuevamente, consideremos el sistema formado por una única partícula, cuya configuración queda determinada por el vector de coordenadas generalizadas $q = (q_1, q_2, q_3)$. En este caso, el sistema está descrito por un lagrangiano $L(t, q, \dot{q})$ y, como se muestra en el apéndice C, al derivar esta función respecto del tiempo se obtiene la siguiente identidad

$$\frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^3 \dot{q}_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - L \right) = -\frac{\partial L}{\partial t}, \quad (\text{Ec. 28})$$

donde se define

$$H = \sum_{i=1}^3 \dot{q}_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - L \quad (\text{Ec. 29})$$

como el *hamiltoniano* del sistema. Como se puede observar, si el lagrangiano no depende explícitamente del tiempo, es decir, presenta una simetría temporal de modo que $\partial_t L = 0$, se tiene que H es una cantidad conservada.

Para aquellos sistemas en que la dependencia de la energía cinética con las coordenadas generalizadas se da mediante una función homogénea de segundo orden en $\dot{q}_i$, el hamiltoniano H coincide con la energía mecánica del sistema.

Por ejemplo, para los casos analizados tenemos que

$$L = \frac{1}{2} m \dot{q}^2 - U(q), \quad (\text{Ec. 30})$$

donde q representa las coordenadas relevantes del problema. En el primer ejemplo puede corresponder a las coordenadas cartesianas x o y , mientras que en el segundo puede representar las coordenadas polares r o θ . Independientemente de esta elección, se obtiene que

$$H = \dot{q} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - L = \frac{1}{2} m \dot{q}^2 + U(q) = E. \quad (\text{Ec. 31})$$

Es decir, en este tipo de sistemas el hamiltoniano coincide con la energía mecánica total y además es una cantidad conservada por la ecuación (28).

Cuando el lagrangiano presenta otras dependencias funcionales, la cantidad conservada H puede no coincidir exactamente con la energía mecánica, aunque sigue siendo la constante de movimiento asociada a la simetría temporal del sistema.

7. Simetrías en otros contextos

A lo largo de este trabajo nos hemos concentrado en ejemplos relacionados con sistemas clásicos, ya que históricamente ese fue el punto de partida natural. En este contexto, las simetrías espaciales y temporales se traducen de manera directa en las leyes de conservación del momento lineal, el momento angular y la energía.

Sin embargo, el papel de las simetrías se vuelve aún más profundo y esencial en el marco de las teorías modernas de la física. En tal contexto, las simetrías no solo se consideran una propiedad elegante o deseable, sino que constituyen un elemento fundamental en la formulación misma de las teorías. El teorema de Noether, que como vimos en mecánica clásica relaciona simetrías con leyes de conservación, se ha convertido en

una herramienta central. Toda teoría física consistente debe respetar ciertos tipos de simetría.

Por ejemplo, en la teoría de la relatividad, la invariancia bajo traslaciones y rotaciones en el espacio-tiempo conduce a la conservación del tensor energía-momento y del momento angular relativista. En mecánica cuántica, las simetrías adquieren un rol aún más sutil, la conservación de la carga eléctrica, del número bariónico o del espín, entre otras, pueden entenderse como consecuencia de simetrías internas que actúan en espacios abstractos, más allá del espacio físico ordinario.

En las teorías de campos modernas [8], las simetrías locales (también llamadas simetrías de gauge) desempeñan un papel aún más fundamental, ya que constituyen el punto de partida para formular teorías como la electrodinámica cuántica o el modelo estándar de física de partículas.

En definitiva, el estudio de las simetrías, iniciado en un contexto clásico, se ha transformado en una guía esencial en la búsqueda de leyes más profundas y unificadoras de la naturaleza. Las simetrías ya no cumplen un rol meramente estético en las ecuaciones de movimiento, sino que, en muchos casos, representan la única vía posible para comprender ciertos fenómenos.

8. Conclusiones

A lo largo de este trabajo se buscó ofrecer una visión conceptual y unificada del vínculo entre las simetrías y las leyes de conservación en física. A partir de ejemplos simples y representativos como figuras geométricas y sistemas mecánicos clásicos se introdujo la noción de simetría como una transformación que deja invariante un sistema, estableciendo así el marco intuitivo sobre el que se construyen muchas leyes físicas.

El análisis de casos concretos, como el movimiento parabólico o los potenciales centrales isotrópico y anisotrópico, permitió reconocer el patrón de que las direcciones que presentan simetrías también tienen cantidades conservadas asociadas. Este paralelismo, lejos de ser una coincidencia, fue formalizado por Noether en el teorema que lleva su nombre, cuya potencia conceptual se hace evidente al reformular las leyes del movimiento en términos del formalismo lagrangiano y el principio de mínima acción. La demostración explícita de las leyes de conservación del momento lineal, del momento angular y de la energía permitió ilustrar de manera clara cómo las invariancias bajo traslaciones espaciales, rotaciones y

traslaciones temporales se traducen, respectivamente, en las magnitudes conservadas analizadas previamente.

En definitiva, este recorrido permitió evidenciar que las simetrías no son solo un recurso estético o una propiedad secundaria, sino un principio que otorga coherencia y universalidad a las leyes de la física. El enfoque adoptado, de carácter accesible y conceptual, busca además resaltar el valor pedagógico de estos temas como puerta de entrada al pensamiento teórico en física.

9. Referencias

- [1] P. R. Cromwell, *Polyhedra* (Cambridge University Press, Cambridge, 1977).
- [2] Weyl, H., *Symmetry* (Princeton University Press, Princeton, 1952).
- [3] D. J. Griffiths, *Introduction to Elementary Particles*. 2nd ed. (Wiley-VCH, Weinheim, 2008).
- [4] A. Gonçalves, *Introdução à álgebra* (IMPA, Rio de Janeiro, 1979).
- [5] J. B. Marion, S. T. Thornton, *Classical Dynamics of Particles and Systems*, 5th ed. (Brooks/Cole, New York, 2004).
- [6] S. Castro, *Historia de las matemáticas: del cero al infinito* (The Galobart Books, Madrid, 2019).
- [7] H. Goldstein, C. P. Poole & J. L. Safko, *Classical Mechanics*, 3rd ed. (Addison-Wesley, San Francisco, 2002).
- [8] M. D. Schwartz, *Quantum Field Theory and the Standard Model*. (Cambridge University Press, Cambridge, 2014).
- [9] L. D. Landau & E. M. Lifshitz, *Mechanics*, 3rd ed. (Butterworth-Heinemann, Oxford, 1976).

10. APÉNDICES

10.1. Apéndice A

El formalismo lagrangiano de la mecánica se basa en una idea matemática conocida como cálculo variacional. Esta herramienta, además de constituir el punto de partida habitual para la construcción del formalismo, posee interés propio, ya que permite abordar un problema general de optimización. Para ello será necesario introducir el concepto de *funcional*. De la misma forma que una función $y = f(x)$ no es más que una forma de asociar un número x a otro número y , un funcional es una forma de asociar un número a toda una función. En general lo denotamos por $z = F[f]$. Un ejemplo de esto es, dado un intervalo en la recta real $[x_1, x_2]$ podemos definir el funcional

$$z = F[f] = \int_{x_1}^{x_2} dx [f(x)]^2. \quad (\text{Ec. 32})$$

De esta forma, el funcional anterior calcula la integral del cuadrado de una función f en dicho intervalo y devuelve su valor como el número z .

El problema fundamental del cálculo variacional puede formularse de la siguiente manera. Sea $(x_1, x_2) \subset \mathbb{R}$ un intervalo y sea $g(x, f, f')$ una función dada que depende de la variable x y de una función de clase C^1 , f donde f' simboliza su derivada. Se define el funcional

$$F[f] = \int_{x_1}^{x_2} dx g(x, f(x), f'(x)). \quad (\text{Ec. 33})$$

El problema consiste en determinar la función $f(x)$ que hace extremal (mínima o máxima) la cantidad $F[f]$. Planteado de esta forma, este es un problema muy genérico dado que existen infinitas funciones posibles. Así que normalmente se suelen restringir las funciones a aquellas que además pasan por dos puntos fijos, es decir, se imponen las condiciones de contorno $f(x_1) = y_1$ y $f(x_2) = y_2$. Desde un punto de vista geométrico, como se ilustra en la Figura 8 nos interesa encontrar la función f que extrema el funcional F dados dos puntos fijos.

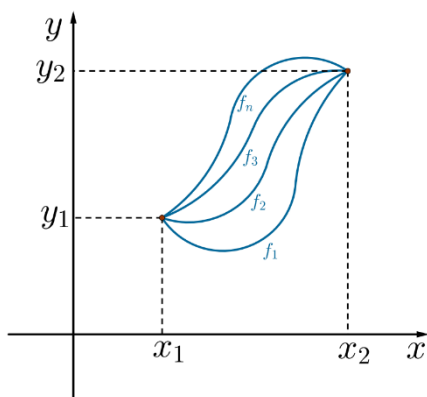


Figura 8. Gráficos de posibles funciones que conectan dos puntos fijos (x_1, y_1) y (x_2, y_2) .

Introducimos el símbolo δ para denotar una variación de la función $f(x)$ en todos los puntos del intervalo $[x_1, x_2]$, es decir, $\delta f(x)$. Entonces el problema anterior se traduce en resolver la ecuación $\delta F = 0$ con condiciones de borde $\delta f(x_1) = \delta f(x_2) = 0$. La resolución detallada de esta ecuación se presenta en el apéndice B, aquí sólo enunciamos el resultado fundamental. La función que resuelve el problema anterior es aquella que satisface

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial g}{\partial f'} \right) - \frac{\partial g}{\partial f} = 0. \quad (\text{Ec. 34})$$

Este resultado recibe el nombre de *ecuación de Euler-Lagrange* que no es más que una ecuación diferencial de segundo orden para la función f a la que se le debe imponer las condiciones de contorno $f(x_1) = y_1$ y $f(x_2) = y_2$.

Para el caso en que el funcional ya no depende de una única función f sino que depende de todo un conjunto finito de ellas $\{f_i(x)\}$ con $i = 1, \dots, N$ se tiene que

$$F[\{f_i\}] = \int_{x_1}^{x_2} dx g(x, f_1(x), f_1'(x), \dots, f_N(x), f_N'(x)) \quad (\text{Ec. 35})$$

Con las condiciones $f_i(x_1) = f_i^{(1)}$, $f_i(x_2) = f_i^{(2)}$ y en tal caso, la condición extremal se obtiene resolviendo un conjunto de N ecuaciones diferenciales de la forma

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{\partial g}{\partial f'_i} \right) - \frac{\partial g}{\partial f_i} = 0. \quad (\text{Ec. 36})$$

Lo anterior se puede demostrar de la misma forma que para el caso de una única función escribiendo la variación δF en función de las variaciones de las funciones δf_i e imponiendo que estas variaciones son nulas en los extremos del intervalo $[x_1, x_2]$.

10.2. Apéndice B

Retomemos el problema de encontrar la función f que extrema el funcional definido en la ecuación (33). Para ello, basta con imponer $\delta F = 0$ con condiciones de borde $\delta f(x_1) = \delta f(x_2) = 0$ [9]. Por lo tanto, tenemos que

$$\int_{x_1}^{x_2} \delta F = \delta \int_{x_1}^{x_2} dx g(x, f(x), f'(x))$$

$$\int_{x_1}^{x_2} = \int_{x_1}^{x_2} dx \left(\frac{\partial g}{\partial f} \delta f + \frac{\partial g}{\partial f'} \delta f' \right) \quad (\text{Ec. 37})$$

Pero $\delta f' = \delta(df/dx) = (d/dx)\delta f$. Entonces, integrando por partes el segundo término,

$$\int_{x_1}^{x_2} dx \frac{\partial g}{\partial f'} \delta f' = \int_{x_1}^{x_2} dx \frac{\partial g}{\partial f'} \frac{d}{dx} \delta f \quad (\text{Ec. 38})$$

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial g}{\partial f'} \delta f(x) \Big|_{x_1}^{x_2} - \int_{x_1}^{x_2} dx \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial g}{\partial f'} \right) \delta f$$

Aplicando las condiciones de variación en los extremos, el primer término es nulo y por lo tanto obtenemos

$$\delta F = \int_{x_1}^{x_2} dx \left[\frac{\partial g}{\partial f} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial g}{\partial f'} \right) \right] \delta f. \quad (\text{Ec. 39})$$

Dado que la variación $\delta f(x)$ es arbitraria, la única forma de que $\delta F = 0$ es que

$$\frac{\partial g}{\partial f} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial g}{\partial f'} \right) = 0. \quad (\text{Ec. 40})$$

10.3. Apéndice C

Para deducir la ecuación (28) partamos del lagrangiano y por regla de la cadena tenemos que

$$\frac{dL}{dt} = \sum_{i=1}^N \frac{\partial L}{\partial q_i} \dot{q}_i + \sum_{i=1}^N \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i + \frac{\partial L}{\partial t}. \quad (\text{Ec. 41})$$

Utilizando la ecuación de Euler-Lagrange para el primer término, podemos reescribir

$$\frac{dL}{dt} = \sum_{i=1}^N \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) \dot{q}_i + \sum_{i=1}^N \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \ddot{q}_i + \frac{\partial L}{\partial t}. \quad (\text{Ec. 42})$$

Observemos que esto se puede reescribir como la derivada de un producto y, por lo tanto

$$\frac{dL}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^N \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \dot{q}_i \right) + \frac{\partial L}{\partial t}, \quad (\text{Ec. 43})$$

que al reordenar finalmente se obtiene el resultado

$$\frac{d}{dt} \left(\sum_{i=1}^N \dot{q}_i \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - L \right) = - \frac{\partial L}{\partial t}. \quad (\text{Ec. 44})$$

IA generativa en la enseñanza de la Física: cómo integrarla sin reemplazar el razonamiento.



Bernardo Pombo ^{1,2}

¹ Instituto de Profesores Artigas, Consejo de Formación en Educación, Montevideo, Uruguay.

² Liceo Nº 1 Eduardo Fabini, Dirección General de Educación Secundaria, Minas, Uruguay.

E-mail: bpombo@gmail.uy

(Recibido el 10/11/2025, aceptado el 9/4/2026)

Resumen

Este artículo analiza cómo integrar la inteligencia artificial (IA) generativa en la enseñanza de la Física de educación secundaria sin desplazar el razonamiento ni la contrastación empírica. Se presenta una revisión bibliográfica narrativa focalizada de investigaciones recientes (2023-2025) sobre desempeño de modelos de lenguaje en instrumentos diagnósticos de mecánica, percepciones estudiantiles, creencias y disposiciones docentes, uso de simuladores como PhET e inserción de *ChatGPT* en secuencias de enseñanza de la Física y contextos *STEM* afines. A partir de esta síntesis se identifican oportunidades para ampliar explicaciones, generar ejemplos y personalizar la interacción con los contenidos, junto con riesgos de comprensiones superficiales, delegación acrítica y tensiones respecto del rol docente. Sobre esa base se formulan cuatro lineamientos para el diseño didáctico con IA en Física (IA como generador de propuestas, verificación sistemática y registro del proceso, contratos de uso explícitos y desarrollo profesional centrado en la práctica) y se ejemplifican estrategias de aula: rutinas de predicción, simulación y explicación, tutoría socrática con bancos tipo *FCI*, análisis crítico de salidas de IA y laboratorios virtuales con *prompts* de indagación. Finalmente, se propone una rúbrica de evaluación centrada en la modelización, la verificación con datos y la trazabilidad del razonamiento, y se discuten condiciones de uso responsable en cursos de Física de ciclo básico y bachillerato en Uruguay.

Palabras clave: inteligencia artificial generativa, enseñanza de la Física, modelos de lenguaje, simulaciones interactivas, evaluación formativa, educación secundaria.

Abstract

This article examines how to integrate generative artificial intelligence (AI) into secondary-school physics teaching without displacing reasoning or empirical validation. It presents a focused narrative literature review of recent studies (2023–2025) on the performance of language models on mechanics diagnostic instruments, student perceptions, teacher beliefs and dispositions, the use of simulators such as PhET, and the incorporation of ChatGPT into physics teaching sequences and related STEM contexts. From this synthesis, it identifies opportunities to expand explanations, generate examples, and personalise interaction with content, alongside risks of superficial understanding, uncritical delegation, and tensions regarding the teacher's role. On this basis, four guidelines are proposed for didactical design with AI in physics (AI as a generator of proposals, systematic verification and process documentation, explicit usage contracts, and practice-centred professional development), and classroom strategies are illustrated: prediction–simulation–explanation routines, Socratic tutoring with FCI-type item banks, critical analysis of AI outputs, and virtual laboratories with inquiry-oriented prompts. Finally, an assessment rubric is proposed that focuses on modelling, verification with data, and the traceability of reasoning, and conditions for responsible use in lower- and upper-secondary physics courses in Uruguay are discussed.

Keywords: generative artificial intelligence, physics teaching, language models, interactive simulations, formative assessment, secondary education.

1. Introducción

¿Qué sentido cobra enseñar Física cuando la IA resuelve ejercicios en segundos?

En los últimos dos años, la IA generativa pasó de ser ciencia ficción a herramienta cotidiana: traduce y produce textos, explica procedimientos, redacta informes. Enseñar Física en este contexto exige rejerarquizar el razonamiento, los modelos y la contrastación empírica por encima de la aplicación mecánica de algoritmos de resolución de ejercicios. Dado que su presencia en la vida cotidiana ya está instalada, el desafío didáctico consiste en definir el lugar que ocupará en el aula y las condiciones de uso, de manera que el docente pueda acompañar y supervisar cómo la emplean los estudiantes.

La literatura reciente ofrece una base útil para abordar ese desafío y para un nuevo encuadre didáctico. Por un lado, reúne estudios que analizan el rendimiento de modelos de lenguaje en inventarios conceptuales de mecánica como el Force Concept Inventory (FCI) [1,2] y trabajos que exploran percepciones estudiantiles y usos de ChatGPT como tutor en cursos de Física y disciplinas afines [3,4]. Por otro lado, incluye revisiones sobre tecnologías para la enseñanza de la Física, en particular simuladores y laboratorios virtuales [5,6], así como estudios sobre creencias y disposiciones docentes frente a la IA generativa [7,8] y experiencias de integración de ChatGPT en temas específicos de Física, como el movimiento de proyectiles, la segunda ley de Newton o la termodinámica de ingeniería [9–11].

En paralelo, la literatura sobre tecnología y aprendizaje de la Física subraya que estos recursos producen mejores resultados cuando se insertan en entornos de aprendizaje activos, con simulaciones, tareas de indagación guiada y retroalimentación formativa, y cuando se articulan con experiencias experimentales reales y/o virtuales [5,6]. Las revisiones sobre IA en educación científica llegan a conclusiones similares: identifican potencial para la personalización, la retroalimentación y la colaboración, pero también advierten la necesidad de marcos éticos claros y de desarrollo profesional docente para una integración contextualizada y coherente [4,5].

En este artículo se utilizan de forma diferenciada los términos *ChatGPT* y *GPT-4*. Se emplea *ChatGPT* para referirse al chatbot de IA desarrollado por OpenAI. Se utiliza *GPT-4* cuando se describe el modelo concreto evaluado en los estudios empíricos citados, por ejemplo, en aplicaciones del FCI o en tareas de resolución de problemas. De este modo se respeta la denominación de las publicaciones originales al presentar resultados de desempeño del modelo y se

utiliza *ChatGPT* para los ejemplos de uso educativo en el aula.

Este trabajo, entonces, busca traducir esa evidencia en acciones didácticas específicas para docentes de secundaria que sienten sobrecarga o recelo ante la IA y preocupación por la vigencia de su rol en el aula. Las propuestas que se presentan a continuación están pensadas principalmente para cursos de Física de ciclo básico y bachillerato en Uruguay, aunque pueden adaptarse a otros contextos educativos.

2. Metodología. Revisión bibliográfica narrativa focalizada

Este trabajo adopta una revisión narrativa focalizada orientada por la siguiente pregunta: ¿Qué usos y condiciones de implementación de modelos de IA generativa en la enseñanza de la Física, en educación secundaria y en contextos afines plausiblemente extrapolables a ella, se han documentado recientemente, y qué lineamientos de diseño didáctico, estrategias de aula y criterios de evaluación se pueden derivar para el aula de Física?

La búsqueda principal se realizó en bases de datos académicas y repositorios abiertos mediante la cadena: (*"physics education" OR "physics teaching" OR "physics classroom"*) AND (*"generative AI" OR "large language model*" OR ChatGPT OR "AI chatbot" OR "openAI"*) AND (*"secondary school" OR "high school" OR "upper secondary"*) AND (*"teaching strategies" OR "classroom activities"*). Esta búsqueda inicial arrojó 89 artículos arbitrados publicados entre 2023 y 2025. Se aplicaron como criterios de inclusión: a) foco en enseñanza de Física o contenidos de Física dentro de cursos STEM, b) presencia explícita de modelos de lenguaje o IA generativa en el diseño didáctico, c) contexto de educación secundaria o, cuando se trató de educación superior o de otros niveles, posibilidades claras de extrapolación al aula de Física escolar. Se excluyeron trabajos centrados en programación, robótica u otras áreas STEM sin componentes de Física y aquellos donde la IA aparecía solo como herramienta administrativa.

A partir de estos criterios se seleccionó un conjunto de estudios que cubren cuatro ejes: a) desempeño de modelos de lenguaje en evaluaciones conceptuales de mecánica, como el FCI [1,2]; b) percepciones estudiantiles al usar ChatGPT como tutor o apoyo conversacional en Física y contextos afines [3,4]; c) revisiones sobre tecnologías para la enseñanza de la Física, en particular simuladores como PhET [5,6]; d) creencias y disposiciones docentes ante la IA generativa [7,8] y su uso en la formación inicial de profesorado de Física [12]. Se incorporaron además

estudios cuasi experimentales con ChatGPT en Física de secundaria [9,11] y trabajos en otros niveles educativos donde los hallazgos resultan plausiblemente extrapolables a secundaria, como la integración de ChatGPT en educación STEM en la primera infancia [13] y en cursos de termodinámica en ingeniería [10].

Dentro de este conjunto se incorporaron también investigaciones que analizan con detalle la interacción entre estudiantes y asistentes de IA en el diseño de indagaciones abiertas de Física [14] y estudios que evalúan de manera sistemática el desempeño de distintos modelos de lenguaje ante concepciones alternativas específicas en mecánica newtoniana en secundaria [15].

Sobre esta base se realizó una lectura comparativa y se codificaron patrones comunes en torno a: rol de la IA (tutor, generador de propuestas, apoyo al diseño docente), tipo de evidencia (mejora de rendimiento, cambio conceptual, percepciones, barreras de implementación) y tensiones éticas y condiciones de uso responsable señaladas en la literatura. De la síntesis de estos patrones emergen los lineamientos de diseño didáctico presentados en la sección 4, así como las propuestas de actividades y de evaluación de las secciones 5 y 6.

3. Síntesis de hallazgos relevantes para situar la enseñanza

3.1. Percepciones estudiantiles de IA como tutor

Ding et al. [3] reportan que estudiantes valoran a ChatGPT como tutor conversacional para pedir aclaraciones, ejemplos y pasos intermedios. Esa valoración mejora cuando el curso tiene un encuadre didáctico explícito: reglas de uso, para qué sirve, cuándo procede, qué se espera de la calidad de las respuestas (claridad de supuestos, consistencia de unidades, fuentes citables), cómo manejar sesgos y cómo verificar de forma independiente lo que la IA propone. Este encuadre puede apoyarse en rúbricas que hagan visibles esos criterios y orienten tanto la producción de los estudiantes como la retroalimentación docente.

Por ejemplo, en una clase de Física sobre cinemática, una regla podría ser: “Puedo pedir a ChatGPT que explique qué es aceleración centrípeta y que me dé tres ejemplos, pero debo verificar esa explicación con una simulación PhET antes de usarla en mi tarea”. Este tipo de acuerdos explícitos transforman la percepción estudiantil: la IA pasa de ser un recurso

prohibido, y por tanto tentador, a una herramienta con reglas y responsabilidades.

3.2. Capacidad de los LLM¹ en tópicos introductorios

West [2] explica que GPT-4 contesta correctamente 22 de 23 ítems de una versión modificada del FCI, con un rendimiento equiparable al de estudiantes de alto desempeño en cursos introductorios de mecánica. Resultados similares aparecen en la evaluación de GPT-4 con el FCI reportada por Aldazharova et al. [1]: el modelo logra muy buenos resultados en ítems asociados, por ejemplo, a la tercera ley de Newton, pero presenta falsos positivos y falsos negativos cuando debe interpretar figuras, razonar sobre situaciones espaciales complejas o tratar fuerzas de rozamiento. Se consideran falsos positivos los casos en que la respuesta final es correcta pero la justificación es pobre o parcialmente errónea, y falsos negativos aquellos en que el razonamiento intermedio parece plausible pero la respuesta final resulta incorrecta [1].

Que un modelo de lenguaje acierte en preguntas de Física no implica que “entienda” los fenómenos. Más bien reconoce patrones estadísticos en los enunciados y en las soluciones frecuentes, lo que explica por qué puede obtener respuestas correctas sin explicitar supuestos clave, como la ausencia de rozamiento o la idealización de ciertos cuerpos. Por eso el desafío pedagógico no es evaluar respuestas, sino procesos: ¿el estudiante identifica y justifica supuestos?, ¿elige modelos apropiados?, ¿verifica con datos de simulaciones o mediciones? En este contexto, las tareas centradas en respuesta cerrada y explicación breve pueden ser fácilmente resueltas por la IA; conviene rediseñarlas hacia la comparación de modelos, la contrastación con datos, la explicación de límites de aplicabilidad y la crítica de errores sutiles de la propia IA [1,2].

Además de los estudios que caracterizan el desempeño de los modelos de lenguaje en inventarios como el FCI, existen trabajos que se centran en concepciones alternativas puntuales y en el potencial de la IA como tutor para abordarlas. Kahaleh y Lopez [15] analizan cómo ChatGPT, Gemini y Copilot responden a una idea errónea muy extendida en mecánica: la creencia de que, para que un ascensor se mueva hacia arriba, la fuerza del cable debe ser mayor que el peso incluso cuando se desplaza con velocidad constante. A partir de diálogos entre 32 docentes y los modelos, construyen un marco de evaluación con tres criterios (exactitud, personalización y eficacia pedagógica) que

¹ modelos de lenguaje de gran tamaño (Large Language Models, LLM)

luego aplican en un segundo estudio con 25 docentes. Los resultados muestran una valoración alta de ChatGPT en exactitud conceptual y en uso de estrategias didácticas (preguntas, ejemplos y recapitulaciones), así como un desempeño más irregular en personalización y en el uso de ayudas visuales como diagramas o simulaciones.

3.3. Tecnologías de apoyo al razonamiento en Física

Las revisiones sobre PhET señalan que las simulaciones potencian la comprensión conceptual, la indagación y el compromiso, pero su impacto depende de la integración pedagógica y del desarrollo profesional docente [6]. Recomendaciones típicas incluyen diseñar guías de indagación, promover discusión entre pares y articular con experiencias experimentales reales o virtuales.

Un riesgo frecuente en este terreno es confundir la simulación con la experiencia experimental real. PhET resulta especialmente útil para explorar preguntas del tipo “Si cambio esto, ¿qué sucede?”, en un ambiente controlado y con un número acotado de variables. Esa exploración gana valor cuando posteriormente los estudiantes realizan mediciones en un contexto físico, aunque sea con materiales simples. Ramaila [6] documenta de manera consistente que la combinación de PhET, preguntas bien diseñadas y actividades experimentales con mediciones reales, ya sea en el laboratorio o con materiales simples en el aula, se asocia con aprendizajes más sólidos, mientras que un uso aislado de la simulación tiende a derivar en exploraciones sin anclaje empírico.

De forma análoga, la evidencia reciente sobre IA generativa en educación científica muestra que herramientas como ChatGPT pueden contribuir al aprendizaje de contenidos específicos de Física cuando se integran en secuencias de trabajo estructuradas. En secundaria, por ejemplo, se observan mejoras en el rendimiento en temas de movimiento de proyectiles al combinar una estrategia de aprendizaje autorregulado con GPT-4, frente a la enseñanza expositiva tradicional [11], y en la comprensión de la segunda ley de Newton en estudiantes de bachillerato en Emiratos Árabes Unidos [9]. En el nivel universitario, la integración de ChatGPT como recurso de apoyo en un curso de termodinámica de ingeniería se asocia con incrementos en comprensión conceptual y reducción de algunas concepciones alternativas, en particular sobre entropía y energía interna, aunque persisten dificultades en tareas cuantitativas y de razonamiento avanzado [10].

Al mismo tiempo, investigaciones que analizan el desempeño de GPT-4 en instrumentos diagnósticos como el FCI evidencian resultados heterogéneos: el modelo obtiene altos niveles de acierto en diversos

ítems, particularmente en aquellos relacionados con la tercera ley de Newton, pero presenta dificultades persistentes en problemas que requieren interpretación de figuras, razonamiento espacial o análisis de situaciones con fricción. Asimismo, en ciertas respuestas reproduce explicaciones próximas a concepciones intuitivas vinculadas al impulso y la cantidad de movimiento [1].

Estos resultados refuerzan la necesidad de tratar las respuestas generadas por IA como hipótesis de trabajo que requieren contraste, y no como fuente automática de validación conceptual.

Además, se han identificado efectos problemáticos cuando el uso de la IA se basa en la aceptación acrítica de sus soluciones. Investigaciones recientes advierten que la resolución de problemas de Física asistida por ChatGPT puede favorecer comprensiones superficiales y dependencia de la herramienta si no se acompaña de consignas claras de análisis y verificación de las respuestas de la IA mediante simulaciones, cálculos o mediciones [16]. Estos hallazgos convergen con revisiones más amplias sobre IA en educación científica, que destacan tanto oportunidades para la personalización y la retroalimentación inmediata como la necesidad de marcos de uso que preserven el desarrollo del pensamiento crítico y la resolución de problemas [5].

En conjunto, las simulaciones interactivas y la IA generativa pueden entenderse como tecnologías de apoyo al razonamiento en Física que demandan un diseño didáctico cuidadoso. La literatura sugiere que su aporte resulta más consistente cuando se integran en ciclos de predicción, experimentación, análisis y discusión: *PhET* como recurso para explorar hipótesis y visualizar relaciones entre variables antes o después de actividades experimentales, y *ChatGPT* como andamiaje para formular predicciones, explicitar supuestos, comparar argumentaciones y revisar concepciones alternativas. La responsabilidad docente se orienta, en este escenario, a planificar secuencias en las que estas herramientas se articulan con actividades de modelización, contrastación empírica y explicación, de manera que acompañen el trabajo intelectual de los estudiantes en lugar de reemplazarlo.

3.4. Indagación abierta y cognición distribuida con IA

El uso de IA generativa en actividades de indagación no se limita a resolver problemas cerrados de Física, también puede intervenir como apoyo en la fase más delicada del trabajo en el aula: el diseño de las investigaciones. Min, Lee y Jho [14] desarrollan un asistente de indagación basado en GPT-4 que acompaña a estudiantes de educación media en la formulación de preguntas, la identificación de variables y la

construcción de procedimientos experimentales a partir de problemas abiertos inspirados en el International Young Physicists' Tournament. El análisis de 93 intercambios alumno-IA muestra que las preguntas se organizan en cinco tipos de contenido (variables, materiales, proceso experimental, análisis/resultados y conocimiento conceptual) y que la IA cumple un papel distinto según el tipo de pregunta planteada, ya sea como fuente de información o como agente que revisa y mejora planes de indagación propuestos por el propio alumnado.

Este estudio se apoya en el marco de la cognición distribuida y concibe al asistente de IA como un "agente cognitivo externo" que amplía la capacidad de los estudiantes para coordinar variables, anticipar dificultades metodológicas y refinar sus diseños, mientras el docente sigue a cargo de estructurar la tarea, interpretar las sugerencias de la IA y alinearlas con los objetivos formativos de la asignatura [14].

Esta perspectiva resulta especialmente relevante para la enseñanza de la Física, donde la planificación de actividades experimentales controladas y la explicitación de supuestos son componentes centrales del trabajo experimental y de modelización en el aula. En la sección 5 se retoma esta tipología de preguntas y la noción de cognición distribuida para diseñar actividades de indagación apoyadas en IA generativa en cursos de Física [14].

3.5. Oportunidades y riesgos del uso de IA en la enseñanza de la Física

Los trabajos revisados coinciden en que la IA generativa abre oportunidades para ampliar las fuentes de explicación, ofrecer ejemplos adicionales y personalizar la interacción con el contenido de Física, tanto en secundaria como en educación universitaria [3,4,10,11]. En estudios con grupos control y experimental se reportan mejoras en el rendimiento cuando ChatGPT se integra en secuencias de trabajo estructuradas, en comparación con enfoques expositivos tradicionales, especialmente en temas que suelen presentar dificultades persistentes, como el movimiento de proyectiles o la segunda ley de Newton [9,11].

Al mismo tiempo, varios autores advierten que estos beneficios no son automáticos y que la IA puede promover comprensiones superficiales si los estudiantes se limitan a aceptar sus respuestas sin analizar los supuestos físicos implicados [16]. Evaluaciones del desempeño de modelos como GPT-4 en instrumentos diagnósticos de mecánica (FCI) muestran una combinación de aciertos elevados en algunos ítems y errores sistemáticos en otros,

reflejando concepciones alternativas similares a las del propio alumnado [1,2]. Estas limitaciones refuerzan la necesidad de tratar las respuestas generadas por IA como hipótesis de trabajo que requieren contraste con simulaciones, cálculos y mediciones, más que como soluciones definitivas.

Finalmente, los estudios sobre creencias y disposiciones docentes destacan que la integración de IA generativa se percibe simultáneamente como oportunidad y como fuente de inquietud respecto del rol profesional: emergen preocupaciones por la calidad y fiabilidad de las respuestas, por el posible impacto en el esfuerzo cognitivo de los estudiantes y, en algunos casos, temores a que la herramienta pueda desdibujar la función del profesorado en el aula [7,8]. Estas tensiones refuerzan la necesidad de contar con criterios pedagógicos claros, ejemplos de actividades y espacios de reflexión entre docentes que ayuden a decidir en qué momentos, con qué fines y con qué condiciones incorporar la IA en las clases de Física.

3.6. Creencias y disposiciones docentes

La investigación de Cabellos, de Aldama y Pozo [7] reúne evidencia empírica de que las creencias pedagógicas y las disposiciones hacia la tecnología influyen de manera decisiva en cómo el cuerpo docente adopta la IA generativa. El estudio muestra que quienes sostienen enfoques más constructivistas y han experimentado con estas herramientas tienden a percibir más posibilidades para apoyar la enseñanza y el aprendizaje, mientras que quienes se identifican con enfoques más reproductivos, o tienen poca experiencia de uso, enfatizan sobre todo los riesgos, en particular la pérdida de esfuerzo cognitivo y los problemas de integridad académica. A partir de estos resultados, las autoras y el autor subrayan la necesidad de marcos éticos explícitos, espacios de trabajo colaborativo entre docentes y un uso de la IA sometido a criterios de rigor y transparencia. Esta evidencia puede orientar también el desarrollo profesional en educación secundaria. Apunta a la conveniencia de crear espacios específicos para el cuerpo docente de Física, en los que (a) se discutan creencias y expectativas respecto de la IA, (b) se ensayen propuestas de actividades de aula con estas herramientas, con apoyo y retroalimentación de colegas y formadores, y (c) se acuerden criterios compartidos para un uso responsable de la IA en sus cursos, incluyendo la elaboración y el intercambio de rúbricas que hagan explícitos esos criterios en la evaluación.

Estos hallazgos se reflejan también en estudios específicos con docentes de Física en ejercicio. Wattanakasiwich, Kaewkhong y Katwibun [8] describen cómo los docentes de Física se distribuyen en distintas

fases de adopción de la IA generativa según la teoría de difusión de innovaciones, identificando barreras como la falta de conocimiento técnico, las limitaciones lingüísticas de los modelos y la preocupación por el impacto en el pensamiento analítico de los estudiantes. En programas de formación inicial de docentes de Física, Guerrero-Zambrano et al. [12] muestran que el uso guiado de ChatGPT para diseñar actividades lúdicas favorece tanto la familiaridad con la herramienta como la calidad de las propuestas didácticas. Estos resultados refuerzan la idea de que la integración de IA en la enseñanza de la Física depende menos de la herramienta en sí y más de marcos éticos explícitos, espacios de trabajo colaborativo y oportunidades de experimentar con actividades concretas en contextos de acompañamiento profesional.

4. Lineamientos derivados de la revisión sobre IA y enseñanza de la Física

A partir de la revisión bibliográfica narrativa focalizada descrita en la sección 2, y de la comparación de resultados en contextos de Física en enseñanza secundaria, formación docente y entornos STEM afines, emergen cuatro lineamientos operativos para orientar el diseño didáctico con IA en Física. Estos lineamientos recogen patrones consistentes en estudios sobre desempeño de modelos de lenguaje, impacto en el aprendizaje conceptual, percepciones estudiantiles y creencias docentes [1,3–6,8–10,2]:

- 1) **IA como generador de propuestas, no como autoridad.** La IA no es una fuente incuestionable, sino un generador de hipótesis. Preguntar siempre: ¿qué supuestos adopta? ¿Qué variantes del problema considera? ¿En qué condiciones su solución sería inválida? West [2] documenta que ChatGPT responde bien, pero sin explicitar supuestos clave, por eso esta interrogación es imprescindible. Vincular respuestas con diagramas, gráficos, simulaciones y datos.
- 2) **Verificar siempre, documentar el proceso.** La IA genera respuestas rápido, pero la rapidez no es validez. Exigir siempre verificación externa: simulación, cálculo propio, o medición breve. Igual de importante es que el estudiante documente el proceso (*prompts* usados, respuestas clave, comparación con simulación) para que la retroalimentación sea trazable y la evaluación pueda valorar razonamiento, no solo producto.
- 3) **Contrato de uso de IA.** Acordar con la clase cuándo y cómo se utiliza, con reglas de citación de *prompts* y verificación. Ding et al. [3] subrayan que la percepción positiva aumenta cuando hay pautas claras y acompañamiento docente.

- 4) **Formación centrada en la práctica docente.** El impacto educativo de la IA depende de la capacidad del cuerpo docente para integrarla en actividades de Física con un propósito didáctico claro. Las revisiones recomiendan un desarrollo profesional específico que parta de la propia experiencia de aula: rediseño de actividades y evaluaciones, integración de IA con simulaciones y actividades experimentales, y elaboración de rúbricas que valoren razonamiento, uso de modelos y verificación con datos. Este tipo de formación, ligada al trabajo cotidiano, permite que la IA se incorpore como apoyo al aprendizaje y a la evaluación auténtica, en lugar de quedar como un recurso externo o puramente técnico.

5. Sugerencia de estrategias y secuencias didácticas

Las estrategias que se presentan a continuación ilustran algunas posibilidades de trabajo con IA en Física, pero no agotan el repertorio posible ni pretenden cubrir la diversidad de enfoques que se está desarrollando en la práctica docente.

5.1. Rutina “Predecir → Simular → Explicar”

Objetivo: Analizar la coherencia entre las predicciones de un modelo, los resultados de una simulación y los datos obtenidos.

Pasos:

- 1) **Generación asistida:** pedir al LLM tres predicciones para una situación concreta. Ej.: “carrito sobre plano horizontal con coeficiente de rozamiento cinético bajo”. Los estudiantes escriben las tres, las leen en voz alta y explican qué supuestos adopta cada una.
- 2) **Contrastación en PhET:** ejecutar la simulación con parámetros controlados. Los estudiantes registran qué predicción resulta compatible con los datos.
- 3) **Explícito sobre límites:** redactar un párrafo que indique qué cambia si se modifica un supuesto. Estas tres fases capitalizan la capacidad explicativa de la IA y, al mismo tiempo, llevan a los estudiantes a contrastar lo obtenido con evidencia y a explicitar el dominio de validez del modelo, en línea con la literatura sobre ventajas pedagógicas de las simulaciones y la indagación guiada.
- 4) **Indicador formativo:** rúbrica que puntúe la identificación de variables relevantes, elección de modelo, justificación y control de supuestos, coherente con la evidencia sobre los efectos de una

retroalimentación específica y oportuna identificados por Mahligawati et al. [5].

Este enfoque no sustituye la práctica de resolución numérica de problemas, que sigue siendo necesaria para desarrollar fluidez en el uso de modelos y en el manejo de magnitudes; más bien la sitúa en secuencias donde el estudiantado alterna momentos de cálculo sin asistencia de IA con momentos de análisis cualitativo, contraste con simulaciones y revisión crítica de respuestas generadas por el modelo.

5.2. “ChatGPT como tutor socrático” con banco tipo FCI

Objetivo: Analizar concepciones alternativas sobre una idea clave de mecánica (por ejemplo, la tercera ley de Newton) mediante un diálogo guiado con *ChatGPT* y la resolución de ítems tipo *FCI*.

Procedimiento:

- 1) **Selección de foco conceptual.** El docente elige uno o dos ítems de un banco tipo *FCI* o una pregunta abierta que apunte a una concepción alternativa frecuente (por ejemplo, que la fuerza de acción es “mayor” que la de reacción cuando un camión choca con un automóvil).
- 2) **Diseño del prompt.** El docente construye un *prompt* para *ChatGPT* en clave de tutor socrático, por ejemplo: “Actúa como tutor de Física. No des la respuesta final de inmediato. Haz preguntas de seguimiento que me ayuden a pensar sobre la tercera ley de Newton en la siguiente situación: [descripción del ítem]. Al final te pediré que revises mi explicación y mi diagrama de fuerzas”.
- 3) **Diálogo guiado con ChatGPT.** En parejas o tríos, los estudiantes interactúan con el tutor conversacional respondiendo a las preguntas, elaborando una explicación propia y dibujando el diagrama de fuerzas correspondiente. Registran el intercambio relevante (preguntas clave del tutor, respuestas que los hicieron cambiar de idea, etc.) en una hoja de trabajo.
- 4) **Verificación con instrumento externo.** Una vez que el grupo alcanza una explicación “final”, responde el ítem *FCI* original o realiza una exploración breve en *PhET* “Fuerzas y movimiento” con parámetros acordados, y anota si los resultados respaldan o contradicen la explicación construida con el tutor.
- 5) **Puesta en común y síntesis docente.** En plenario, se comparan explicaciones y diagramas, se identifican patrones de concepciones alternativas y se explicita el modelo aceptado, recuperando los errores más frecuentes y discutiendo qué aportó y qué no aportó el tutor conversacional para superarlos.

En términos evaluativos, puede resultar útil una rúbrica que ponga el foco en tres aspectos: qué tan claramente formulan la tercera ley como interacción entre cuerpos, la corrección del diagrama de fuerzas y la capacidad de detectar y corregir errores presentes en sus propias respuestas o en las propuestas de *ChatGPT*. De este modo, la experiencia retoma el potencial del tutor conversacional descrito por Ding et al. [3] y Guo et al. [4], pero mantiene la conducción en manos del docente gracias a la verificación con instrumentos externos y a la discusión colectiva.

5.3. Prueba crítica de soluciones de IA

Objetivo: Identificar errores conceptuales o incoherencias en respuestas de *ChatGPT* sobre un tema de mecánica y corregirlos utilizando modelos y datos trabajados en clase.

Procedimiento: el docente selecciona un ítem conceptual tipo *FCI* sobre fuerzas o movimiento, idealmente uno donde el modelo de IA utilizado haya mostrado errores sutiles, por ejemplo, una situación de interpretación de diagramas [1]. Se pide a la IA que responda el ítem “explicando el razonamiento paso a paso para estudiantes de secundaria”. El texto se edita mínimamente para ocultar la fuente y se entrega a la clase como “solución propuesta”. La consigna para los estudiantes puede estructurarse en tres pasos:

- 1) **Detección:** subrayar al menos dos afirmaciones que consideren dudosas o insuficientemente justificadas.
- 2) **Contraste con modelos y datos:** usar un diagrama de fuerzas, una simulación *PhET* o un experimento sencillo para verificar si esas afirmaciones son compatibles con los modelos de la Física en secundaria.
- 3) **Reescritura:** elaborar una versión corregida de la explicación, indicando explícitamente los supuestos y el límite de validez del modelo utilizado.

West [2] y Aldazharova et al. [1] documentan explicaciones mayormente correctas de *ChatGPT* acompañadas de errores conceptuales finos o de supuestos no explicitados, lo que convierte este tipo de actividad en un contexto auténtico para practicar lectura crítica de textos científicos y discusión entre pares. La IA funciona aquí como fuente de error “verosímil”, que obliga a justificar los modelos en juego en lugar de aceptar pasivamente una respuesta bien redactada.

En esta modalidad resulta especialmente útil trabajar con ejemplos concretos de salida de IA que combinan un registro técnico aceptable con un modelo físico erróneo. El siguiente ítem conceptual, inspirado en situaciones de tipo *FCI*, ilustra el tipo de actividad que se propone:

Una bola se mueve dentro de un canal horizontal sin rozamiento. En cierto tramo deja de actuar cualquier empuje externo y la bola continúa su movimiento dentro del canal.

- 1) ¿Qué fuerzas actúan sobre la bola mientras se mueve en el tramo recto del canal, una vez que ha dejado de ser empujada?
- 2) La siguiente explicación fue generada por un modelo de IA para responder a esta pregunta:

“La fuerza en la dirección del movimiento sigue actuando porque la inercia de la bola la impulsa hacia adelante. Además, actúa la fuerza de gravedad hacia abajo.”

En el aula, se pide a los estudiantes que trabajen con esta salida de IA deliberadamente “creíble pero defectuosa”:

- 1) Identificar qué elementos de la explicación resultan razonables (por ejemplo, la mención del peso y la referencia a la trayectoria rectilínea).
- 2) Localizar el error conceptual: la respuesta aborda la inercia como si fuera una fuerza que “empuja” al cuerpo y sugiere que el “golpe” o empuje inicial deja una fuerza persistente en la dirección del movimiento.
- 3) Reescribir una explicación físicamente correcta, apoyada en un diagrama de fuerzas y en la segunda ley de Newton, indicando que en el tramo descrito la única fuerza que actúa sobre la bola es el peso (y la fuerza normal si se explicita la interacción con el canal), mientras que el movimiento uniforme se explica por ausencia de fuerza neta horizontal y no por una “fuerza de la inercia”.

Este tipo de tarea permite explicitar una concepción cercana a la física aristotélica que también aparece en respuestas de estudiantes y en algunas salidas de modelos de lenguaje, y convierte la respuesta de IA en un recurso para contrastar modelos: el foco no está en “corregir a la IA”, sino en usar una explicación verosímil pero equivocada como ocasión para afinar los criterios con que se decide qué es una buena explicación en Física.

5.4. Laboratorios virtuales con prompts de indagación

Objetivo: pasar del “ver” al “explicar” en actividades de laboratorio virtual y en experiencias sencillas de aula.

Diseño general: cada guía de laboratorio virtual combina tres elementos:

- 1) un *prompt* inicial para la IA que genere hipótesis cuantitativas y un plan preliminar de indagación;
- 2) la ejecución de la simulación con registro de datos por parte de los estudiantes;
- 3) una fase final de reinterpretación y comunicación de resultados sin apoyo de IA, que puede extenderse a una experiencia real de aula.

Por ejemplo, en un laboratorio sobre fuerzas y movimiento con rozamiento, usando una simulación tipo *Fuerzas y Movimiento: Fundamentos* o un experimento sencillo con un bloque sobre una mesa y un dinamómetro, la guía puede incluir un *prompt* modelo como:

“Explica dos hipótesis cuantitativas diferentes sobre cómo cambia la fuerza de rozamiento y la aceleración de un bloque cuando se aumenta la fuerza de arrastre, manteniendo constantes la masa y la superficie de contacto. Propón un plan de prueba usando una simulación tipo *PhET* o un experimento con dinamómetro.”

Los estudiantes ajustan el *prompt*, obtienen una propuesta de la IA y la discuten en pequeños grupos, identificando qué magnitudes deben medirse (fuerza aplicada, fuerza de rozamiento, aceleración), qué variables conviene mantener constantes (masa del bloque, tipo de superficie) y qué gráficos serían útiles (fuerza–tiempo, velocidad–tiempo, aceleración–fuerza neta). A continuación, trabajan en la simulación *Fuerzas y Movimiento: Fundamentos* o realizan el montaje real con un bloque y un dinamómetro, registran los datos y elaboran tablas y gráficos.

En la fase final se cierra el acceso a la IA y se pide:

- 1) comparar los datos con las hipótesis iniciales,
- 2) explicar posibles discrepancias (por ejemplo, diferencias entre rozamiento estático y cinético o errores de medida),
- 3) redactar un breve informe donde se argumente qué modelo describe mejor los resultados.

La IA interviene en el diseño inicial de la indagación, al servicio de la generación de hipótesis y planes de trabajo, mientras que la interpretación y la comunicación de resultados quedan a cargo de los estudiantes. La literatura indica que la combinación de simulaciones con preguntas bien diseñadas y experiencias experimentales, reales o virtuales, favorece aprendizajes significativos frente al uso aislado

de simuladores [5,6]. Integrar prompts de indagación en esta estructura permite aprovechar la personalización y la retroalimentación de la IA sin diluir el trabajo de modelización, análisis de datos y argumentación que constituye el núcleo de la actividad experimental en Física.

5.5. Acuerdo explícito de uso de IA

En trabajos recientes sobre creencias docentes y percepciones estudiantiles frente a la IA en educación [4,7] se subraya la importancia de explicitar las condiciones de uso de estas herramientas en cada asignatura. Estos estudios muestran que la ausencia de criterios claros sobre lo que se considera un uso aceptable de la IA genera incertidumbre y tensiones en torno a la honestidad académica; por eso recomiendan acordar reglas de uso con el grupo desde el inicio del curso.

En la práctica, el acuerdo que se construya al inicio del curso puede incluir al menos los siguientes puntos:

- 1) **Qué usos están permitidos:** lluvia de ideas, planificación de experimentos, explicación de conceptos, generación de preguntas.
- 2) **Cuáles no lo están:** cálculos finales de tareas, derivaciones de ecuaciones (sin verificación), respuestas sin análisis crítico.
- 3) **Qué evidencias deben entregarse:** *prompt*, fragmento relevante de la respuesta, verificación mediante simulación o cálculo y una breve reflexión sobre qué ha aprendido.
- 4) **Cómo se cita:** “IA (*ChatGPT-4*, 15 de noviembre): [*prompt*]; verificación: [*método usado*]”.

Este tipo de acuerdo dialoga con los hallazgos sobre percepciones estudiantiles y con los marcos de integridad académica descritos en la literatura reciente sobre creencias docentes e integración de IA en contextos educativos [4,7].

6. Criterios de evaluación para actividades con IA

Se propone una rúbrica que centre la evaluación en la calidad del razonamiento y en el seguimiento del proceso, en lugar de limitarse al acierto del resultado numérico. En consonancia con la literatura sobre evaluación formativa y sobre uso educativo de la IA, la idea es que los criterios de la rúbrica y la retroalimentación asociada hagan visibles los procesos que los estudiantes realizan al modelizar, verificar y registrar su trabajo, y que disuadan la delegación acrítica de la tarea en la herramienta digital [15,16].

En este marco, la rúbrica propuesta organiza la evaluación en torno a cuatro preguntas clave: (1) ¿qué modelo físico eligieron los estudiantes y por qué resulta adecuado frente a otras alternativas?, (2) ¿cómo verificaron las respuestas generadas por la IA (mediante simulaciones, cálculos o mediciones)?, (3) ¿qué discrepancias identificaron entre predicciones y datos y cómo las explicaron? y (4) ¿hasta qué punto dejaron un registro claro y legible de los pasos seguidos, incluyendo *prompts*, respuestas, decisiones intermedias y fuentes de verificación? Valorar estos aspectos permite focalizar la atención en el proceso de modelización y contraste con evidencia, en lugar de centrar la evaluación en la ejecución mecánica de algoritmos.

A modo de ejemplo, una rúbrica sencilla para la actividad presentada en la sección 5.1 puede organizarse en tres niveles (inicial, intermedio y avanzado) en torno a cuatro criterios: a) selección y justificación del modelo físico, b) calidad de la verificación de la respuesta de la IA (uso pertinente de simulación, cálculo o medición), c) análisis de las diferencias entre predicciones y datos, y d) claridad y completitud del registro del proceso. En el nivel inicial, los estudiantes utilizan la IA como fuente de respuestas sin justificar supuestos ni verificar con datos; en el nivel intermedio identifica variables relevantes, contrasta al menos un aspecto cuantitativo y describe de forma sintética el procedimiento; en el nivel avanzado explicita supuestos, contrasta distintos modelos, discute discrepancias y mantiene un registro de *prompts*, respuestas y decisiones suficientemente detallado como para reconstruir el razonamiento más allá del resultado numérico. La Tabla 1 ilustra una posible operacionalización de estos niveles y criterios para actividades que combinan IA y simulaciones en Física.

Además de valorar el desempeño de los estudiantes, resulta pertinente evaluar de manera formativa el propio desempeño de la IA en las actividades de aula. Kahaleh y Lopez [15] proponen un marco simple con tres criterios (rigurosidad científica, personalización y eficacia pedagógica) que puede trasladarse al contexto del aula. El cuerpo docente puede usar estos criterios para seleccionar ejemplos de respuestas de IA y analizarlas junto con la clase: ¿la explicación respeta los principios de la mecánica?, ¿adapta el lenguaje al nivel de secundaria?, ¿plantea preguntas y ejemplos que ayuden a revisar una concepción alternativa o se limita a presentar una solución? Esta revisión compartida convierte a la IA en objeto de análisis crítico y refuerza el mensaje central del artículo: se trata de una herramienta que puede facilitar el aprendizaje cuando se integra en secuencias bien diseñadas, pero no reemplaza el esfuerzo ni el

juicio conceptual de quienes aprenden ni de quienes enseñan.

respuestas y comentarios escritos para la retroalimentación formativa.

Tabla 1 Rúbrica para actividades con IA y simulaciones en Física

Criterio	Nivel avanzado	Nivel intermedio	Nivel inicial
Elección y explicitación del modelo físico	Selecciona un modelo físico adecuado para la situación, lo nombra explícitamente y justifica de forma clara por qué es apropiado, vinculándolo con las magnitudes y condiciones del problema.	Selecciona un modelo físico adecuado y lo nombra, pero la justificación es incompleta, confusa o meramente enunciativa (no queda claro cómo se aplica a la situación).	No se reconoce un modelo físico adecuado, o el modelo mencionado es incorrecto o irrelevante para la situación planteada.
Uso crítico de la respuesta de IA	Identifica y explica con claridad los problemas relevantes de la respuesta de la IA.	Identifica al menos un posible problema en la respuesta de la IA, aunque con explicación limitada.	No identifica problemas en la respuesta de la IA ni la cuestiona.
Análisis de discrepancias entre predicción y datos	Analiza con detalle las discrepancias entre predicciones y datos, indicando una explicación principal coherente.	Reconoce de forma general discrepancias entre predicciones y datos, sin análisis detallado.	No relaciona las predicciones con los datos al describir los resultados.
Claridad del registro del proceso seguido	El registro permite seguir con claridad todo el proceso realizado, desde las decisiones iniciales hasta las conclusiones.	El registro permite seguir solo los pasos principales del proceso, con algunas lagunas.	El registro no permite reconstruir el proceso realizado.

Nota. Por razones de espacio se presenta una versión sintética de la rúbrica, centrada en cuatro criterios y tres niveles de desempeño. En la práctica debería ampliarse con ejemplos de

7. Discusión

Los estudios revisados coinciden en que la IA generativa no actúa como un sustituto neutral de la enseñanza de la Física, sino como una herramienta cuya integración amplifica tanto oportunidades como riesgos. Por un lado, se han documentado mejoras en el rendimiento y en la comprensión conceptual cuando ChatGPT se integra en actividades de aprendizaje autorregulado o de indagación guiada [9–11]. Por otro, las percepciones de docentes y estudiantes subrayan riesgos vinculados a formas superficiales de aprendizaje, pérdida de esfuerzo cognitivo, inequidades en el acceso y dudas sobre la validez futura del rol docente, especialmente en lo que respecta a la evaluación y a la enseñanza de contenidos disciplinares [3,4,7,8,13,17].

En este panorama, los resultados de la literatura convergen en una serie de condiciones para un uso responsable: explicitar y negociar reglas de uso con el grupo, situar la IA en tareas que exijan modelizar, contrastar y explicar, verificar de forma sistemática lo generado mediante simulaciones o mediciones, y contar con espacios de desarrollo profesional donde los docentes de Física puedan experimentar, discutir y ajustar sus prácticas. Los lineamientos y estrategias propuestos en este artículo se inscriben en ese horizonte, al priorizar la IA como andamio del razonamiento físico bajo conducción docente y no como sustituto de la actividad intelectual de quienes aprenden.

Un aspecto menos desarrollado en la literatura, pero relevante para la práctica cotidiana, es el impacto de estas propuestas en la carga de trabajo docente y en las expectativas de cobertura de contenidos. Diseñar secuencias de indagación con IA, elaborar rúbricas centradas en el razonamiento y revisar producciones donde interviene el asistente requiere tiempo de planificación, coordinación y corrección que no es neutro. En contextos de currículos extensos y tiempos de clase ajustados, esto obliga a tomar decisiones sobre qué temas se trabajan con mayor profundidad conceptual y qué lugar mantienen las prácticas tradicionales de resolución de problemas numéricos.

8. Conclusiones

La IA no reemplaza al docente de Física; al contrario, vuelve más necesario el acompañamiento pedagógico del docente para orientar aprendizajes significativos en un contexto donde las respuestas rápidas están disponibles en cualquier dispositivo. La tarea docente se concentra en lo medular de la disciplina: construir y seleccionar modelos pertinentes, explicitar supuestos, contrastar con datos y comunicar límites de validez.

La literatura revisada sugiere que, cuando la IA se integra con reglas claras, conjuntamente con simulaciones y actividades experimentales, y en el marco de una evaluación formativa basada en tareas de modelización, contraste y justificación, la IA puede contribuir a aprendizajes de mayor profundidad. En particular, favorece la elaboración de explicaciones, la comparación de modelos, la exploración de variantes y la discusión crítica de errores, siempre que los estudiantes deban verificar lo generado con evidencia y dejar registro del proceso seguido. En un escenario educativo que exige pensamiento crítico, capacidad de modelizar y manejo autónomo de información, este uso de la IA puede liberar tiempo de aula para el razonamiento físico y reducir el peso de tareas rutinarias, aunque ello no está exento de costos: obliga a revisar el equilibrio entre la cantidad de contenidos abordados y la profundidad con que se trabajan, y a aceptar que parte del esfuerzo docente se desplazará desde la preparación de repartidos de ejercicios hacia el diseño y ajuste de actividades de indagación, instrumentos de evaluación y pautas de uso de la IA.

En el contexto uruguayo, este desafío es a la vez profesional y colectivo. Los espacios de coordinación, como las coordinaciones de asignatura y de nivel, así como las salas docentes institucionales, departamentales o regionales, ofrecen oportunidades para acordar el lugar de la IA generativa en las clases de Física, explicitar contratos pedagógicos, compartir experiencias exitosas y revisar criterios de evaluación. En esos ámbitos, el cuerpo docente puede compartir secuencias didácticas, rúbricas, materiales y criterios, de modo que existan acuerdos mínimos comunes sobre el uso de la IA, respetando al mismo tiempo la libertad de cátedra, el estilo de cada docente y las particularidades de cada grupo. En ese marco, los modelos de lenguaje pueden integrarse como andamiaje del razonamiento físico bajo conducción docente, y no como sustitutos de la experiencia, de la reflexión ni de la decisión pedagógica.

9. Referencias

- [1] S. Aldazharova, G. Issayeva, S. Maxutov & N. Balta, Assessing AI's problem solving in physics: Analyzing reasoning, false positives and negatives through the force concept inventory, *Contemporary Educational Technology* 16, ep538 (2024).
- [2] C. G. West, AI and the FCI: Can ChatGPT project an understanding of introductory physics? *arXiv* 2303.01067 (2023).
- [3] L. Ding, X. Li, M. Jiang & A. Gapud, Students' perceptions of using ChatGPT in a physics class as a virtual tutor, *International Journal of Educational Technology in Higher Education* 20, 63 (2023).
- [4] F. Guo, T. Li & C. J. L. Cunningham, One year in the classroom with ChatGPT: Empirical insights and transformative impacts, *Frontiers in Education* 10, 1574477 (2025).
- [5] F. Mahligawati, E. Allanas, M. H. Butarbutar & N. A. N. Nordin, Artificial intelligence in physics education: A comprehensive literature review, *Journal of Physics: Conference Series* 2596, 012080 (2023).
- [6] S. Ramaila, Pedagogical affordances of physics education technology in teaching and learning: A systematic review, *The International Journal of Technology, Knowledge, and Society* 20, 109–131 (2024).
- [7] B. Cabellos, C. de Aldama & J. I. Pozo, University teachers' beliefs about the use of generative artificial intelligence for teaching and learning, *Frontiers in Psychology* 15, 1468900 (2024).
- [8] P. Wattanakasiwich, K. Kaewkhong & D. Katwibun, Physics instructors' acceptance and implementation of generative AI, *Physical Review Physics Education Research* 21, 010155 (2025).
- [9] K. Alarbi, M. Halaweh, H. Tairab, N. R. Alsalihi, N. Annamalai & F. Aldarmaki, Making a revolution in physics learning in high schools with ChatGPT: A case study in UAE, *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education* 20, em2499 (2024).
- [10] T. El Fathi, A. Saad, H. Larhzil, D. Lamri & E. M. Al Ibrahim, Integrating generative AI into STEM education: Enhancing conceptual understanding, addressing misconceptions, and assessing student acceptance, *Disciplinary and Interdisciplinary Science Education Research* 7, 6 (2025).
- [11] O. A. Obasi & F. O. Nnadi, Effect of self-regulated-learning strategy through chat-generative-pretrained-transformer on secondary school students' achievement in projectile motion concepts, *Journal of Science Education (JOSCED)* 4, 1–13 (2023).

- [12] M. Guerrero-Zambrano, L. Sanchez-Alvarado, B. Valarezo-Chamba & E. Lamilla-Rubio, Transforming physics teacher training through ChatGPT: A study on usability and impact, *Education Sciences* 15, 887 (2025).
- [13] H. Uğraş, M. Uğraş, S. Papadakis & M. Kalogiannakis, Innovative early childhood STEM education with ChatGPT: Teacher perspectives, *Technology, Knowledge and Learning* 30, 809–831 (2025).
- [14] T. Min, B. Lee & H. Jho, Integrating generative artificial intelligence in the design of scientific inquiry for middle school students, *Education and Information Technologies* 30, 15329–15360 (2025).
- [15] R. Kahaleh & V. Lopez, Evaluating large language models in high school physics education: Addressing misconceptions and fostering conceptual understanding, *Physics Education* 60, 025013 (2025).
- [16] H. A. Mustofa, M. R. Bilad & N. W. B. Grendis, Utilizing AI for physics problem solving: A literature review and ChatGPT experience, *Lensa: Jurnal Kependidikan Fisika* 12, 78–97 (2024).
- [17] T. Famaye, C. S. Bailey, I. Adisa & G. A. Irgens, “What makes ChatGPT dangerous is also what makes it special”: High-school student perspectives on the integration or ban of artificial intelligence in educational contexts, *International Journal of Technology in Education* 7, 174–199 (2024).

La primera pila y la rana que la parió.



Bruno Almeida ^{1,2}

¹ Liceo N.º 2 "Héctor Miranda", Dirección General de Educación Secundaria, Montevideo, Uruguay.

² Liceo N.º 10 "Dr. Carlos Vaz Ferreira", Dirección General de Educación Secundaria, Montevideo, Uruguay.

E-mail: brunoalmeidap24@gmail.com

(Recibido el 11/11/2025, aceptado el 16/3/2026)

Resumen

Este artículo es resultado de una indagación bibliográfica y reconstrucción narrativa de un caso de la Historia de la Ciencia: la invención de la primera pila. El primer bloque del texto recorre el contexto científico de la época, el proceso de discusión científica que nace con los experimentos del matrimonio Galvani-Galeazzi, la interpretación que llevaría a Alessandro Volta a inventar la pila y los impactos que tuvo. En un segundo bloque, se bosquejan algunas posibilidades didácticas para la enseñanza de la Física a partir de este caso.

Palabras clave: historia de la Ciencia, pila voltaica, galvanismo.

Abstract

This article is the result of a bibliographic research and narrative reconstruction of a case from the History of Science: the invention of the first electric pile. The first section of the text explores the scientific context of the time, the process of scientific discussion that began with the experiments of the Galvani-Galeazzi couple, the interpretation that led Alessandro Volta to invent the battery, and its impact. The second section outlines some didactic possibilities for teaching Physics based on this case.

Keywords: history of Science, voltaic pile, galvanism.

Advertencia de contenido:

El presente artículo incluye descripciones e ilustraciones de prácticas científicas que pueden resultar sensibles para algunos lectores. Se sugiere que el docente valore la pertinencia y el modo de presentación de estos contenidos en función de la edad y particularidades del grupo con el que se trabaje.

1. Introducción

La historia de la invención de la pila es comúnmente retratada como un duelo intelectual entre Alessandro Volta y Luigi Galvani, luego de que este último descubriera por total accidente que las ancas de rana que se disponía a cenar se movían como si aún tuvieran vida al colgarlas de un gancho de bronce. Sin aclararse qué tiene esto que ver con una pila, se cuenta que Volta investigó el caso para concluir en la invención de este aparato que cambiaría la tecnología moderna.

Esta versión simplificada de la historia fomenta una visión descontextualizada y mítica del desarrollo científico a la vez que omite aspectos relevantes como el contexto científico y académico que posibilitó la creación de la pila, el rol desacreditado de Lucía Galeazzi, el protagonismo de Giovanni Aldini en la controversia o la inspiración de Volta en el órgano eléctrico de las anguilas eléctricas y peces torpedo.

Para promover una perspectiva menos sesgada de la ciencia es que este artículo reconstruye narrativamente la historia con mayor rigor intentando mostrar las múltiples aristas del caso. A su vez, se bosquejan posibilidades didácticas para utilizarlo en la enseñanza de la Física en educación media.

2. Contexto científico

2.1. La ciencia de la electricidad

Hacia fines del siglo XVIII, la electrostática ya estaba muy cercana a como la conocemos actualmente [1]. Los fenómenos eléctricos se conocían desde la Antigüedad, si bien tuvieron su sistematización y desarrollo principalmente en los siglos XVII y XVIII. Como contribución más reciente tenemos a la ley de Coulomb que fue publicada en el año 1785. Por entonces, solo se le agregarían como grandes aportes la ecuación de Poisson décadas después y un siglo más tarde el descubrimiento del electrón.

Además de la madurez conceptual de la electrostática, el proceso de sistematización fue acompañado del desarrollo tecnológico. Los generadores electrostáticos contaron con distintos

prototipos desde el siglo XVII que fueron perfeccionándose por varios científicos. La máquina de Ramsden de 1768 fue uno de los modelos más utilizados [2] y es el aparato con el que contó Galvani, según las ilustraciones que se muestran más adelante.

Otro dispositivo eléctrico popular e influyente fue la botella de Leyden (véase figura 1). Este dispositivo fue inventado en 1745 por un grupo de científicos de la Universidad de Leyden, Países Bajos. Es el precursor de los condensadores o capacitores, puesto que servía para almacenar grandes cantidades de carga eléctrica. Consistía en una botella ordinaria de cristal cuyo interior y exterior estaban revestidos por delgadas láminas metálicas. Si una de las láminas se conecta a tierra y la otra a un cuerpo cargado (por ejemplo, por medio de un generador electrostático), entonces la carga queda almacenada en las láminas. Posteriormente se pueden realizar descargas eléctricas conectando el exterior y el interior [3].

A pesar de este despliegue de la ciencia de la electricidad, tanto los fenómenos naturales que se observaban como los dispositivos inventados no producían más que breves descargas eléctricas y por lo tanto el concepto de corriente eléctrica no existía. El desarrollo de la electricidad estaba supeditado a esta condición.



Figura 1. Ejemplar de una botella de Leyden. Reproducido de [4].

2.2. Lo eléctrico y lo orgánico

En cuanto a la relación entre lo eléctrico y lo orgánico, los peces eléctricos fueron la pieza clave en el desarrollo de este conocimiento. Que la electricidad tenía efectos sobre los organismos vivos era un conocimiento antiguo: civilizaciones como la egipcia utilizaban la descarga eléctrica del pez gato eléctrico para tratar la artritis [5] y en Sudamérica los nativos conocían a las anguilas eléctricas o gimnotos (nombre científico *Electrophorus electricus*) [3]. De hecho, en la década de 1760 el jesuita español Ramón María Termeyer realiza uno de los primeros estudios sobre las anguilas eléctricas en el Río de la Plata, basándose en los de Bertrand Bajon en la Guayana Francesa [6].

Cuando se llevan ejemplares de rayas torpedo y anguilas a Europa, los ingleses John Walsh, John Hunter y Hugh Williamson estudian la anatomía y funcionamiento de estos peces eléctricos. Descubren así que el órgano eléctrico que genera las descargas está conformado por un conjunto de células apiladas llamadas electrocitos [7].

Es fundamental comprender que estos conocimientos circundaban el escenario científico de la controversia Galvani-Volta [8] e influenciaron no solo sus temas de investigación sino también sus interpretaciones e ideas.

3. La electricidad animal

La controversia científica que culminará con la invención de la pila comienza con las investigaciones de un matrimonio italiano: Luigi Galvani y Lucía Galeazzi.

Galvani (1737-1798) (véase figura 2) se formó durante cinco años como médico en la Universidad de Bolonia, centro al que volvería años más tarde a enseñar Anatomía tras ejercer en hospitales. El tema central de su curso era el papel fundamental de la electricidad en la vida, pensamiento fundado en las publicaciones de varios físicos italianos [9].



Figura 2. Retrato de Luigi Galvani. Reproducido de [10].

Galeazzi (1743-1790) (véase figura 3), hija de un profesor de Galvani, fue una religiosa que se dedicó principalmente al estudio de las letras y por ello era quien revisaba y corregía los textos de su esposo. Además, comenzó a practicar y enseñar medicina en la Universidad de Bolonia al igual que Galvani [11].

La vida profesional y académica era un núcleo esencial del matrimonio. Al mudarse a su propia casa, fundan un laboratorio en el que realizan sus estudios sobre el papel de la electricidad en los organismos, tema que cobraba relevancia en la academia. Durante la década de 1780, junto a sus sobrinos, el matrimonio realiza experimentos con ranas muertas que concluirán en la publicación de *De viribus electricitatis in motu musculari* (Sobre las fuerzas de la electricidad en el

movimiento muscular) en 1791 bajo la autoría de Luigi Galvani [12,13]. Lucía no viviría la publicación de sus trabajos ni el debate científico que encendieron a causa del asma por el que falleció [11].



Figura 3. Retrato de Lucía Galeazzi. Reproducido de [14].

3.1 Sobre las fuerzas de la electricidad en el movimiento muscular (Galvani, 1791)

El texto de corte expositivo-argumentativo se divide en una introducción, un desarrollo en tres apartados y una conclusión. El narrador es el propio Galvani, mientras que su esposa y sus sobrinos no son nombrados, únicamente aludidos al referirse a sus “asistentes”. La introducción comienza describiendo cómo observaron contracciones musculares en una rana disecada cercana a una máquina eléctrica al tocar con un bisturí los nervios de sus patas. Este suceso genera el asombro de Galvani y sus asistentes, que comienzan un proceso de experimentación dividido en tres partes.

La primera parte se titula *Los efectos de la electricidad artificial en el movimiento muscular*. Aquí se cuentan las sucesivas pruebas a las que sometieron a las ranas disecadas utilizando diferentes dispositivos eléctricos, entre ellos la máquina electrostática de Ramsden, el electróforo de Volta y la botella de Leyden, como se observa en la figura 4.

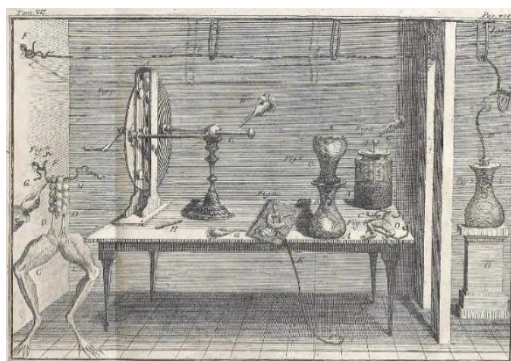


Figura 4. Dibujos de los experimentos sobre la electricidad artificial. Reproducido de [13].

En la segunda parte, *Los efectos de la electricidad atmosférica en el movimiento muscular*, se pregunta si los efectos musculares pueden generarse también con la electricidad atmosférica. Para ello, conecta la rana a un pararrayos durante un día de tormenta y vuelve a observar contracciones, incluso haciéndolo con animales vivos. Pero para su mayor sorpresa, también se repetían las contracciones en días despejados.

En el tercer apartado, *Los efectos de la electricidad animal en el movimiento muscular*, se encamina a postular su hipótesis de la electricidad animal, sospechando que los efectos de la electricidad artificial y atmosférica no eran la verdadera fuente de las contracciones. Entonces se encerró en una pieza del laboratorio y dispuso las ranas sobre una placa de hierro (véase figura 5). Observó que al presionar el gancho de cobre en el que colgaban las ranas sobre la placa volvían a producirse movimientos musculares.

A modo de conclusión, Galvani postula su hipótesis de lo que se llamaría electricidad animal. Haciendo una analogía con la botella de Leyden, propone que existe una electricidad propia del animal, distinta a la ordinaria, que se almacena en los músculos y al transmitirse por los nervios causa el movimiento de los organismos vivos.

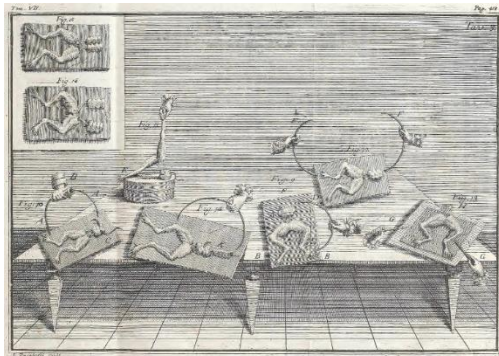


Figura 5. Dibujos de los experimentos sobre la electricidad animal. Reproducido de [13].

La publicación de este tratado comenzó un debate científico sobre las causas del movimiento muscular. La interpretación galvánica, irónicamente, no fue defendida por Luigi Galvani, quien ahora viudo disminuyó su actividad pública [15]. El principal defensor de su postura fue uno de los sobrinos con los que había trabajado: Giovanni Aldini (1762-1834). Este joven físico agregó notas al tratado de su tío e hizo publicaciones propias defendiendo la interpretación de la electricidad animal.

4. El giro de Volta

Del otro lado, quien se presentaba como principal opositor era el flamante Alessandro Volta (1745-1827) (véase figura 6) [16]. Este físico había nacido en Como, Italia, en el seno de una familia de la nobleza. A pesar de los deseos de su familia en estudiar una carrera jurídica, Volta se las ingenió para dedicarse a las ciencias a partir de su educación superior. Ya para los albores del debate sobre la electricidad animal, era un prolífico científico que había publicado numerosas veces en la Real Sociedad de Londres, catedrático de Física Experimental en la Universidad de Pavia que había inventado aparatos como el electróforo, la balanza electrométrica y el condensador (sucesor de la botella de Leyden).



Figura 6. Retrato de Alessandro Volta. Reproducido de [17].

Desde 1793, Volta se opone a la interpretación de la electricidad animal en una publicación en las *Philosophical Transactions* de la Real Sociedad de Londres [18]. En 1796 publica *Sobre la electricidad que se genera durante el contacto entre conductores desiguales* mostrando la sensación de sabor que se produce al colocar metales diferentes en contacto, en particular plata y zinc, separados por la lengua. Este curioso efecto había sido ya publicado por Johann Georg Sulzer en 1752, pero es Volta quien adjudica por primera vez un origen eléctrico al fenómeno [19].

Convencido del origen inorgánico de la electricidad en el galvanismo y apoyado en sus propios experimentos, Volta adjudica la fuente de la corriente eléctrica al contacto de dos conductores metálicos diferentes dispuestos en una solución acuosa o conductor húmedo y lo toma como un principio general. En una carta del 20 de marzo de 1800 a la Real Sociedad titulada *Sobre la electricidad excitada por el mero contacto de sustancias conductoras de diferentes tipos* [20], Volta expone la construcción de un nuevo aparato basado en este principio e inspirado en el órgano eléctrico de los peces eléctricos, al que llama *órgano eléctrico artificial*. Consistía en una columna de discos apilados -como los electrocitos del órgano eléctrico animal- de tres materiales colocados sucesivamente: un metal cualquiera sea, cartón humedecido en un líquido conductor y un segundo metal diferente al primero

(véase figura 7). Repitiendo este patrón se genera una “fuente perpetua de fluido eléctrico”, es decir, un aparato que crea una corriente eléctrica. Además, presentó una variante hecha con tazas.



Figura 7. Ejemplar de una pila voltaica. Reproducido de [21].

5. El día después

La creación de la pila en un simbólico comienzo del siglo XIX constituyó un elemento revolucionario en la Física y en la tecnología. Por un lado, la introducción de este nuevo aparato hizo posible la noción del concepto de corriente eléctrica como nueva entidad física que, como sabemos, es el nexo que uniría la electricidad y el magnetismo a partir del efecto Oersted. A su vez, permitió avanzar en el desarrollo tecnológico al permitir la construcción de circuitos eléctricos en régimen estacionario.

A Alessandro Volta se le adjudica el nacimiento de la electroquímica, no solo porque los principios que hacen funcionar la pila son electroquímicos sino también porque, gracias a este dispositivo, los científicos William Nicholson y Anthony Carlisle descubrieron la electrólisis del agua menos de un año después de la publicación de Volta [22].

A Luigi Galvani, y se debiera agregar a Lucía Galeazzi, se le atribuye el nacimiento de la electrofisiología, en tanto sus trabajos respaldan por primera vez la naturaleza eléctrica de los impulsos nerviosos y su relación con las funciones musculares.

A pesar de la pretensión de Volta de acabar con el debate sobre el galvanismo al exponer su nueva pila, Giovanni Aldini continuó haciendo oposición al pensamiento de Volta en búsqueda de utilizar la electricidad como herramienta terapéutica. Extendió los experimentos de las ranas muertas a animales de sangre caliente y más tarde a cadáveres humanos (véase figura 8) que conseguía principalmente de criminales ejecutados. Así comienza una gira por Europa divulgando la teoría de la electricidad animal y haciendo demostraciones públicas de los efectos de la electricidad en cadáveres y enfermos [16]. Se dice que

la figura de Giovanni Aldini inspiró a Mary Shelley a escribir su famosa obra *Frankenstein* o *El moderno Prometeo*.

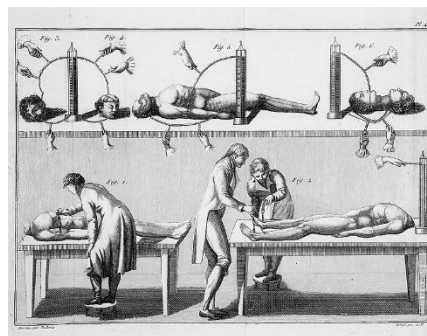


Figura 8. Ilustraciones de los experimentos de Aldini con cadáveres humanos. Reproducido de [23].

Como vemos, la controversia no necesariamente glorificó a un único científico ya que tanto Volta como Galvani, Galeazzi y Aldini tuvieron sus triunfos y sus desaciertos. Por un lado, el grupo de trabajo de Galvani se equivocó al asumir la existencia de una electricidad propia de los animales, si bien descubrió e interpretó correctamente el origen eléctrico de las contracciones musculares. Por otro lado, Volta refutó las ideas galvánicas y encontró un origen inorgánico en la corriente eléctrica, pero se equivocó al pensar que todo efecto electrofisiológico necesita de dos metales diferentes como fuente de corriente [24].

6. Posibilidades didácticas del caso

Sin desestimar la capacidad de los docentes de elaborar y fundamentar propuestas didácticas que involucren esta historia, a continuación, se esbozan sencillamente posibles énfasis no excluyentes entre sí que pueden realizarse en el abordaje del caso en la enseñanza de la Física.

En un primer énfasis, se puede destacar el carácter *interdisciplinario* que ha tenido el proceso de invención de la pila. La historia muestra vínculos directos con la Medicina, la Biología y la Química, así como puntos de conexión con la Literatura y la Filosofía, asignaturas comúnmente desestimadas a la hora de coordinar actividades o contenidos. Como temas de ejemplo para trabajar interdisciplinariamente se proponen: la naturaleza eléctrica de los impulsos nerviosos, el potencial de acción, la electrólisis del agua, procesos redox en la pila voltaica, Frankenstein y la física detrás o debates filosóficos en torno a la vida y las causas del movimiento muscular o a la ética científica.

Por otro lado, el enfoque puede estar en la *epistemología* del caso, poniendo el ojo en el proceso de construcción de conocimiento de Galvani y de Volta y su contexto histórico. Como ejemplos, se proponen la construcción de la noción de circuito eléctrico cerrado y de corriente eléctrica continua, la realización de debates sobre galvanismo o la identificación de hipótesis y sus validaciones a lo largo del caso.

Otro énfasis posible reside en lo *lingüístico*. Dado que la forma de acercarse al conocimiento de la historia es a través de fuentes escritas, la enseñanza de la lectura y escritura en Física cobra un nuevo sentido. En nuestra disciplina existen formas características de leer y escribir, géneros discursivos propios y un lenguaje científico que nos compete enseñar. Por lo tanto, el uso de los textos de Galvani y Volta en el aula puede cumplir el cometido de alfabetizar científicamente. A modo de ejemplo, puede implementarse la deconstrucción de las fuentes primarias para aprender a escribir un texto expositivo-argumentativo, el análisis de los recursos argumentativos utilizados por los autores o la escritura de textos análogos a partir de experiencias de aula y ejercicios de imaginación.

También podemos enfatizar en el componente *experimental-práctico* de la Física a partir de este caso. A lo largo de la historia del caso, los distintos actores realizan experimentos para investigar y probar sus hipótesis, muchos de los cuales son reproducibles en un laboratorio de Física. Como ejemplos, se proponen la construcción de una pila voltaica casera, la electrólisis del agua utilizando una pila casera o la reproducción de experimentos como el de las ancas de rana o la generación de sabores en la lengua. Respecto a estas últimas posibilidades, dado que involucran aspectos sensibles y riesgosos, es necesario que el docente responsable revise las limitaciones que el sistema educativo puede imponer para estas actividades. Se sugiere consultar a la Inspección de Biología sobre los protocolos actuales respecto a experimentos con vertebrados y el uso del cuerpo humano de los estudiantes.

Por último, el énfasis puede estar en la relevancia *sociocultural* de la tecnología. La pila voltaica fue un salto cualitativo en el desarrollo tecnológico y a partir de ella se ha organizado gran parte de nuestra vida en sociedad. Por ello, una opción es enfocarse en enseñar el impacto social, tecnológico y ambiental que tuvo la invención y posterior evolución de la pila como manera de formar ciudadanos críticos. Los temas de ejemplo que se proponen son el análisis de la evolución de la pila y su producción y consumo, una investigación sobre los impactos ambientales y sociales de la pila, la realización de campañas informativas de dichos impactos o campañas de reciclaje y buen uso de pilas en la institución educativa.

7. Conclusiones

Se espera que la complejidad, la controversia y la riqueza que hacen a la historia de la primera pila hayan quedado plasmadas en esta narración, así como las oportunidades de enseñar Física a partir del caso y el valor de la Historia para aprender y enseñar Ciencia.

El esbozo de posibilidades para la enseñanza de la Física resulta simple y esquemático. Si bien cumple la función de inspirar o brindar ideas a los docentes, serían valiosas propuestas didácticas más detalladas y contextualizadas que hagan uso de este o cualquier caso en la historia de nuestra ciencia.

Es deseable que la comunidad de docentes de Física continúe encontrando en la Historia de la Ciencia un amplio campo de conocimiento para enriquecer la enseñanza de la disciplina y que, a partir de ello, se desarrollen producciones aún más ambiciosas y enriquecedoras que la presentada en este artículo.

8. Referencias

- [1] J. Jeans, Los dos siglos siguientes al de Newton en *Historia de la física hasta mediados del siglo XX*, editado por Fondo de Cultura Económica (Fondo de Cultura Económica, Ciudad de México, 2016), pp. 318-320.
- [2] L. Figuier, La Machine Électrique en *Les Merveilles de la science ou description populaire des inventions modernes*, editado por Jouvet y Cía (Librairie Furne, París, 1867), pp. 429-490.
- [3] G. Gamow, La edad de la electricidad en *Biografía de la Física*, editado por Salvat Editores (Alianza Editorial, España, 1971), pp. 100-102.
- [4] Rama, Leyden jar-MHS 2034-P5200037-gradient, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Leyden_jar-MHS_2034-P5200037-gradient.jpg (2018).
- [5] ScotCat, Malapterurus electricus (Gmelin, 1789), https://www.scotcat.com/factsheets/malapterurus_electricus.htm (2007).
- [6] M. de Asúa, The Experiments of Ramón M. Termeyer SJ on the Electric Eel in the River Plate Region (c. 1760) and other Early Accounts of Electrophorus electricus, *Journal of the History of the Neurosciences*, 17(2), pp. 160-174 (2008).
- [7] J. Hunter, An Account of the *Gymnotus Electricus*, *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 65, pp. 395–407 (1775).
- [8] M. Piccolino, Luigi Galvani's path to animal electricity *C. R. Biologies*, 329, pp. 303-318. (2006).
- [9] Wikipedia, Luigi Galvani, https://it.wikipedia.org/wiki/Luigi_Galvani#cite_note-18 (s.f.).

- [10] Wikimedia Commons, Luigi Galvani, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Luigi_galvani.jpg (s.f.).
- [11] M. Focaccia, Galeazzi Galvani Lucia, <https://scienzaa2voci.unibo.it/biografie/76-galeazzi-galvani-lucia> (s.f.).
- [12] L. Galvani (1953). *Commentary on the effects of electricity on muscular motion* (Waverly Press, Inc., Massachusetts, 1953).
- [13] L. Galvani, *De viribus electricitatis in motu musculari commentarius* (Typographia Instituti Scientiarum, Bologna, 1791).
- [14] Wikimedia Commons, Lucia Galeazzi Galvani, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Portrait_of_Lucia_Galeazzi_Galvani_pair.png (s.f.).
- [15] A. Parent, Giovanni Aldini: From Animal Electricity to Human Brain Stimulation, en The Canadian Journal Of Neurological Sciences, Vol. 31, (4), pp. 576–584 (2004).
- [16] A. De Micheli-Serra, Recordando a Luigi Galvani en el bicentenario de su muerte, en Gac. Méd., Vol. 135, (3), pp. 325-330 (1999).
- [17] Wikimedia Commons, Picture of A. Volta, the noted physicist and electrical researcher, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Volta_A.jpg?uselang=it (s.f.).
- [18] A. Volta, Account of some discoveries made by Mr. Galvani, of Bologna; with experiments and observations on them. In two letters from Mr. Alexander Volta, F. R. S. Professor of Natural Philosophy in the University of Pavia, to Mr. Tiberius Cavallo, Philosophical Transactions of the Royal Society, (83), pp. 10-44 (1793).
- [19] E. T. Whittaker, *A History Of Theories Of Aether and Electricity* (Hodges, Figgis, & Co., Ltd., Dublin, 1910).
- [20] A. Volta, On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. In a letter from Mr. Alexander Volta, F. R. S. Professor of Natural Philosophy in the University of Pavia, to the Rt. Hon. Sir Joseph Banks, Bart., Philosophical Transactions of the Royal Society, (90), pp. 127-129 (1800).
- [21] Museo della Scienza e della Tecnologia "Leonardo da Vinci", Pila a colonna, di Volta, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pila_a_colonna, di Volta - Museo scienza tecnologia Milano 02104 2014.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pila_a_colonna,_di_Volta_-_Museo_scienza_tecnologia_Milano_02104_2014.jpg) (s.f.).
- [22] Wikipedia, William Nicholson (chemist), [https://en.wikipedia.org/wiki/William_Nicholson_\(chemist\)#cite_note-12](https://en.wikipedia.org/wiki/William_Nicholson_(chemist)#cite_note-12) (s.f.).
- [23] Wellcome Collection, Essai théorique et expérimental sur le galvanisme, avec une série d'expériences. Faites en présence des commissaires de l'Institut National de France, et en divers amphithéâtres anatomiques de Londres par Jean Aldini / [Giovanni Aldini], <https://wellcomecollection.org/works/q2patb5a> (s.f.).
- [24] B. Dibner, Luigi Galvani, en *Encyclopaedia Britannica* (2024).

“Sobre hombros de gigantes”: Graciela Scavone, una vida de compromiso con la enseñanza de la Física.



Fiorella Casais¹, Guzmán Trinidad¹

¹ Liceo Solymar N.º 1 “Jorge Lazaroff”, Dirección General de Educación Secundaria, Montevideo, Uruguay.

E-mail: fiorellacasais@gmail.com, guzman.trinidad@gmail.com

(Recibido el 8/4/2026, aceptado el 8/5/2026)

Resumen

El presente artículo reconstruye una de las trayectorias académicas y profesionales vinculadas con la enseñanza de la Física más amplia de la que tenemos conocimiento en nuestro país: la de la profesora Graciela Scavone, con el propósito de contribuir a la recuperación y valorización de experiencias docentes en la enseñanza de la Física en la educación media uruguaya. Desde un enfoque biográfico, se aborda su formación, su desarrollo en diversos ámbitos educativos, su participación en la creación de la Asociación de Profesores de Física del Uruguay, junto con su desempeño en espacios institucionales como la Inspección de Física en el Consejo de Educación Secundaria, y su labor en Formación Docente. De este modo, se analizan sus aportes a la enseñanza y la incorporación de enfoques innovadores, como la modelización y la investigación-acción, el proyecto Pro-Ciencia, entre otros. Se pone de manifiesto la relevancia del trabajo docente en la construcción de la educación científica, y la necesidad de sistematizar y visibilizar estas experiencias para fortalecer el desarrollo profesional y el conocimiento histórico sobre ello.

Palabras clave: Desarrollo profesional docente, Enseñanza de la Física, Trayectoria docente.

Abstract

This article reconstructs one of the most extensive academic and professional trajectories related to physics education in Uruguay: that of Professor Graciela Scavone. Its purpose is to contribute to the recovery and appreciation of teaching experiences in physics education at the secondary level in Uruguay. From a biographical perspective, it examines her training, her development in various educational settings, her participation in the creation of the Uruguayan Physics Teachers Association, her work in institutional spaces such as the Physics Inspectorate of the Secondary Education Council, and her contributions to teacher training. In this way, her contributions to teaching and the incorporation of innovative approaches, such as modeling and action research, and the Pro-Science project, among others, are analyzed. The article highlights the relevance of teachers' work in building science education and the need to systematize and make these experiences visible in order to strengthen professional development and historical knowledge.

Keywords: Teacher professional development, Physics teaching, Teaching career

1. Introducción

La educación, como proceso humano, histórico, cultural, social y político, requiere ser analizada desde una perspectiva temporal y epistemológica. Pese a ello, en nuestro país es limitado el conocimiento sobre los docentes que han participado en la enseñanza de la física y su desarrollo profesional, debido a la escasa documentación sistematizada de sus aportes.

Como antecedente orientado a recoger aspectos vinculados a la enseñanza de la física en Uruguay, se dispone del trabajo realizado por el profesor Alejandro Parrella [1]. En cuanto a los relatos en primera persona, de los 39 números de la Revista Educación en Física, apenas se publicaron 14 entrevistas distribuidas en 7 números. De ese total, solo 8 corresponden a uruguayos, entre ellos físicos, matemáticos, ingenieros y una única mujer técnica en radiología. No existe registro alguno de entrevistas a docentes de física de nivel medio como ocupación principal [2-10].

En cuanto a registros no escritos, se han publicado en formato de audio entrevistas realizadas a los profesores Germán Baldo, Pablo Garateguy, Mario Guerra y Mario Rodríguez [11].

Entendemos que una posible, y seguramente polémica interpretación de este hecho, es que nuestro colectivo valora mucho las profesiones citadas, pero no tanto la propia. En este sentido, resulta fundamental recuperar experiencias, no solo para visibilizar sus contribuciones, sino para comprender el proceso profesional docente y su incidencia en la educación científica.

Por otra parte, en el trabajo desarrollado por Casais & Trinidad [12], se propone realizar una puesta en valor de las mujeres que han contribuido al desarrollo de la física y educación científica en Uruguay.

En este marco, el presente artículo se propone reconstruir la extensa trayectoria académica y profesional de la profesora Graciela Scavone, y sus diversos aportes en la enseñanza de la Física en educación media dentro del Consejo de Educación Secundaria (CES) y superior en el Consejo de Formación en Educación (CFE). Este artículo surge a partir de numerosas comunicaciones telefónicas iniciales, múltiples intercambios de mensajes por WhatsApp, y varios encuentros extensos, de los cuales se generaron más de 4 horas de grabación que produjeron alrededor de 90 carillas de transcripción.

2. De niña a madre y estudiante del IPA.

Graciela Scavone nació el 25 de julio de 1957, en Montevideo. Nieta de inmigrantes italianos que llegaron a Uruguay huyendo de crisis y guerras, creció con una fuerte impronta de autosuficiencia transmitida por su madre. Su adolescencia estuvo marcada por la autonomía, el esfuerzo, y un contexto social complejo en épocas de la dictadura cívico-militar uruguaya. Desde esa etapa de su vida combinó estudio y trabajo, cursando en alguna oportunidad el secundario en el turno nocturno.



Figura 1. Graciela Scavone a sus 15 años. Créditos: G. Scavone.

En ese tiempo desarrolló junto a un compañero, una experiencia de enseñanza particular, brindando clases de apoyo en su barrio, lo que además de permitirle mejorar sus ingresos, consolidó su interés por la enseñanza de forma temprana. La Matemática siempre fue un área de estudio que le interesó, por lo que ingresó a estudiar Ingeniería en Sistemas en la Facultad de Ingeniería.

Las dificultades de adaptación y la búsqueda de una formación más vinculada a la realidad la llevaron a reorientar su camino hacia la docencia en Física, disciplina que integraba su interés por la Matemática y su vocación por enseñar.

“No tenía tiempo como para averiguar si la ingeniería era mi vocación... Necesitaba algo con los pies en la tierra, me encantaba la Matemática, pero necesitaba que incluyera algo de realidad. Hacer Física me parecía que es lo que más se aproximaba. Y siempre me gustó enseñar. Eso sí, desde chica.”

Poco después del nacimiento de su primer hijo, en 1978 y a sus 20 años, ingresó al Instituto de Profesores Artigas (IPA), lo que implicó organizar su formación en condiciones muy exigentes, cursando en horario nocturno y combinando la maternidad con los estudios. Esta etapa, estuvo marcada por una intensa dedicación al estudio, el sostén recibido por redes afectivas y el régimen dictatorial.

El IPA representó un espacio significativo en su trayectoria, especialmente por la experiencia en el laboratorio de Física, que contrastaba con su formación previa de carácter más teórico. Allí pudo explorar de manera práctica los fenómenos físicos, fortaleciendo su comprensión e interés por la disciplina.

“Llegué al IPA, y claro, me atrapó. El laboratorio... pasábamos mucho tiempo allí, era como un mundo aquello donde poníamos la cubeta de ondas, y probábamos, y movíamos, y nos dejaban hacer de todo. Igual, en plena dictadura, uno tenía cierto cuidado. Teníamos miedo de romper algo. Esa cosa que nos echaran también... Tenía unas compañeras que eran como hermanas para mí. Formábamos barra porque el laboratorio de física del IPA era grandioso.”

3. Inicios en la docencia y su formación continua.

En 1980, próximo a finalizar su formación en el IPA, inició su carrera como docente en Educación Pública. Tras inscribirse en Inspección —modo en el que se asignaban los grupos en aquella época—, fue convocada para cubrir horas de Física en el Liceo 26, distribuidas en distintos turnos. Esta primera experiencia fue especialmente significativa: Graciela destacó en la entrevista realizada el recibimiento de la directora y el valor de poder asumir grupos que, de otro modo, habrían quedado sin docente. Recuerda ese período como una etapa “preciosa”, marcada por el entusiasmo y el compromiso con la enseñanza. Su desempeño durante ese año le permitió ser designada con una carga horaria mayor (28 horas) para el año siguiente en el mismo subsistema.

“Entonces tomé esas horas sueltas, un grupo acá, otro allá. Una experiencia preciosa en el año 80 como profesora de Física. Me acuerdo hasta del olor del Liceo cuando entré. La directora saliendo de la dirección a recibirme, porque se enteró que venía una estudiante que era casi egresada en el IPA. Me acuerdo de aquel recibimiento, de aquel momento. Porque uno se olvida de muchas cosas, pero de eso no.”

Sin embargo, este inicio prometedor se vio abruptamente interrumpido por el contexto político de la dictadura. En 1981, al concurrir a confirmar su designación, se encontró con una resolución oficial que disponía su destitución “por orden de la autoridad razones de seguridad”, firmada por una autoridad militar.

Esta decisión estuvo vinculada a sus antecedentes de participación política en la adolescencia, evidenciando el alcance de los mecanismos de control y exclusión del régimen sobre toda la sociedad incluyendo el ámbito educativo. La destitución no solo implicó la pérdida de su cargo, sino también la interrupción de su inserción en la enseñanza pública en un momento clave de consolidación profesional. Pese a esto, Graciela tuvo la posibilidad de continuar con su tarea docente en instituciones educativas privadas. Hay que reconocer que, en este duro período, algunos colegios permitieron trabajar a los profesores destituidos.

Entre 1985 y 2007, desarrolló sus estudios de Licenciatura en Física, ya que decidió continuar su formación académica, motivada por profundizar en la disciplina en un momento en que no existían opciones de especialización posteriores al IPA. Se inscribió en la Facultad de Ciencias, aun sabiendo que no serían revalidados sus estudios previos, lo que implicaba comenzar la carrera desde cero. Sin embargo, su objetivo principal no era la acreditación formal, sino integrarse a un ámbito académico que le permitiera seguir aprendiendo Física. Debido a sus múltiples responsabilidades —trabajo en varios centros educativos, dos hijos pequeños y su situación personal— solo podía cursar una materia por año, lo que dilató su trayecto en la licenciatura.

A pesar de estas dificultades, Graciela destaca el valor formativo de los cursos, especialmente aquellos dictados por docentes como Carlos Zamalvide (Ingeniero Industrial, Licenciado en Física, y profesor egresado del IPA en Física y Matemática). Estos cursos resultaban estimulantes y desafiantes. Asimismo, resalta la experiencia en el laboratorio, un espacio con recursos limitados pero sostenido por la creatividad y el compromiso docente, donde pudo profundizar en el trabajo experimental.

“La licenciatura fue justamente una manera de poder seguir estudiando en aquel momento, porque siempre quise seguir estudiando, pero no existía nada para hacerlo. Lo que me interesaba era integrarme a un ambiente de Física y poder hacerlo, no me importaba si tenía que cursar todo de nuevo, y me encontré con cursos fascinantes para mí. El laboratorio era un lugar increíble.”



Figura 2. Graciela Scavone junto a su esposo Ismael Núñez, y sus hijos. Créditos: G. Scavone.

En una etapa atravesada por adversidades personales, hacia fines de los años 80, participó en una instancia clave de perfeccionamiento profesional a partir de un convenio entre Uruguay y Francia, impulsado por el Ministerio de Educación y el Instituto Nacional de Investigaciones Pedagógicas de París (INRP). Seleccionada entre muchos otros docentes, realizó en Uruguay un curso de especialización en investigación en enseñanza de la Física, que implicaba una formación intensiva con investigadores de distintas disciplinas.

Este proceso le permitió incorporar enfoques innovadores, como la investigación-acción en el aula y la importancia del registro sistemático de la práctica docente. Asimismo, destaca el aprendizaje sobre el valor pedagógico del error, entendido como una oportunidad para comprender los procesos de pensamiento de los estudiantes y mejorar la enseñanza. Estas ideas marcaron profundamente su concepción de la docencia.

“Lo que nos enseñaron estos investigadores es que los docentes tenemos que aprovechar los errores. No preocuparnos si está mal lo que dijo el estudiante. Aprovechar los errores para aprender qué hay atrás, para trabajarlo y no asustarte. Los errores son parte del aprendizaje.”

Como resultado de su desempeño, fue seleccionada —sin haberse postulado a ella— para una beca en Francia, donde permaneció aproximadamente dos meses. Allí pudo integrarse a equipos de investigación, observar prácticas educativas y conocer experiencias innovadoras, como el uso pedagógico de la calculadora en Matemática.

La experiencia en Francia amplió su perspectiva sobre la enseñanza y la investigación educativa, reforzando la idea de integrar teoría y práctica. Sin embargo, al regresar a Uruguay, el cambio de gobierno limitó la posibilidad de capitalizar institucionalmente lo aprendido, evidenciando tensiones entre políticas educativas y continuidad de proyectos.

Además, participó permanentemente en diversas capacitaciones y Encuentros de Profesores de Física realizados por la APFU.



Figura 3. Profesora Graciela Scavone, Camilo Vernazza, Wellington Izemendi, Diego Viera en el VIII Encuentro Nacional de Profesores de Física y IV Encuentro Internacional de Profesores de Física, realizado en Colonia del Sacramento, en el año 1998. Créditos: s/d.

4. Su presencia en el origen de la APFU

En 1988, en Piriápolis, tuvo lugar una Sala Nacional promovida por la Inspección de Física. En ese marco, Graciela presentó junto a otra docente, un taller sobre investigación en enseñanza de la Física, basado en su formación reciente.

Este espacio reunió a docentes de todo el país y permitió fortalecer vínculos, generar confianza, y avanzar hacia la creación formal de la Asociación. En esa oportunidad, se planteó la necesidad de contar con un

espacio propio para la formación permanente y el intercambio profesional. Así, Graciela, junto a otros colegas, participó activamente en el proceso de gestación de la Asociación de Profesores de Física del Uruguay (APFU).

“Así es como se van formando esos vínculos entre gente de diferentes edades, diferentes intereses, empieza a generarse cierta confianza en las personas que hace que se animen a hacer locuras, cosas que no estaban y que hay que crearlas.”

Posteriormente, en una asamblea realizada en el IPA, se decidió fundar la APFU y se conformó una directiva provisoria, presidida por Zamalvide e integrada por la docente y el profesor Amadeo Sosa entre otros.

Este grupo, junto a otros colegas, tuvo la tarea de redactar los estatutos y sentar las bases de la organización, en la asamblea fundacional realizada el 21 de setiembre de 1989, en el Instituto Alfredo Vásquez Acevedo, como consta en el documento de la Figura 4.

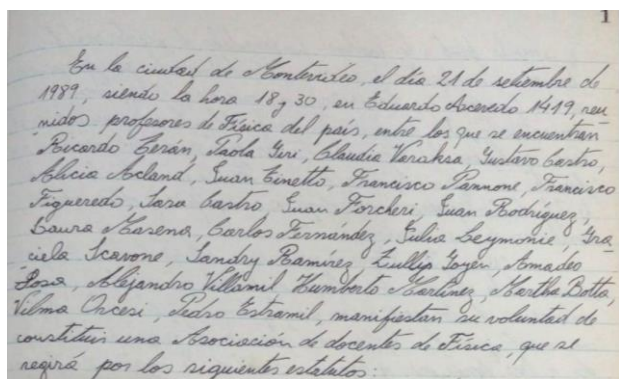


Figura 4. Primera página del Libro de actas de APFU. Créditos: APFU.

En los años siguientes (1989-1990), ya como parte de la directiva, junto a Amadeo Sosa (presidente), Wellington Mazzotti, Martha Botta y Gonzalo Villavedra [13], participó activamente en la organización de actividades, especialmente articulando con docentes del interior del país. Las convocatorias se realizaban de forma artesanal, mediante cartas escritas a mano, en un contexto sin recursos tecnológicos ni financiamiento, lo que implicaba un gran esfuerzo colectivo.

5. Su contribución a la formación de docentes.

Entre 1988 y 2004 se desempeñó como profesora adscriptora en educación secundaria, rol en el que acompañó la formación práctica de numerosos estudiantes de profesorado. Fueron muchos los

practicantes que pasaron por sus clases a lo largo de los años, en un trabajo que, a su juicio, formaba parte natural de su tarea docente.

Su labor como adscriptora implicaba guiar, observar y retroalimentar las prácticas de enseñanza, muchas veces en contextos desafiantes, como laboratorios poco adecuados o grupos numerosos. Aun así, promovía propuestas didácticas activas y experimentales, buscando que tanto los estudiantes como los practicantes vivieran la Física de forma significativa. Algunos de ellos desarrollaron trayectorias destacadas en el ámbito científico, lo que evidencia la incidencia de estas instancias formativas.

Asimismo, resalta la importancia de las estrategias pedagógicas creativas y memorables, como el uso de situaciones inesperadas o narrativas en clase para enseñar conceptos, siguiendo el ejemplo de docentes que la habían marcado. Estas experiencias, muchas veces informales y no sistematizadas, resultaban clave para despertar el interés y la comprensión en los estudiantes.

En este sentido, subraya que gran parte de la riqueza de la enseñanza reside en esas prácticas cotidianas que no siempre trascienden el aula. Por ello, plantea la necesidad de registrar y compartir estas experiencias, para que no queden solamente como anécdotas, sino que puedan contribuir a la construcción colectiva del conocimiento didáctico.

A partir de 2009 comenzó a desempeñarse como profesora de docencia directa en el IPA, dictando cursos de Física I para los profesorados en las especialidades Física y Química. Esta etapa estuvo marcada por el trabajo conjunto con el docente Stelio Haniotis, con quien coordinó la planificación y evaluación de los cursos desde una perspectiva anual, orientada a mejorar el rendimiento estudiantil y la coherencia pedagógica.

El enfoque adoptado se basó en la enseñanza mediante modelización, promoviendo que los estudiantes abordaran situaciones problemáticas reales en lugar de una resolución mecánica de ejercicios. En este marco, los contenidos se organizaban a partir de la construcción de modelos que permitieran identificar variables relevantes y analizar fenómenos físicos.

Esta metodología fue aplicada tanto en clases como en instancias de evaluación, las cuales constaban de pruebas parciales escritas e instancias orales obligatorias. En ellas, los estudiantes trabajaban en grupos, preparaban varios temas y debían exponer uno seleccionado al azar, fomentando la comprensión profunda, el trabajo colaborativo y la capacidad de comunicación oral. Estas prácticas buscaban además fortalecer la autonomía y la participación activa del estudiantado.

El trabajo docente se apoyó en una visión compartida sobre la importancia del error como parte del proceso de aprendizaje, entendido como una oportunidad para revisar hipótesis y construir conocimiento. Asimismo, se promovió el uso de materiales bibliográficos adecuados, destacando la necesidad de contar con libros de referencia para el estudio.

Sobre el año 2012 se desempeñó como profesora adscriptora de estudiantes del Diploma de Especialización en Física, en el marco del convenio entre la Administración Nacional de Educación Pública (ANEP) y la Universidad de la República (UdelAR). Esta instancia implicó la supervisión de prácticas docentes de posgrado realizadas en el IPA por estudiantes provenientes de licenciaturas o de ingeniería.

Su rol como adscriptora fue reducido en número de practicantes, pero significativo en términos de innovación, ya que el diploma incorporaba por primera vez una instancia de práctica docente en formación dentro de este nivel. En particular, trabajó con dos estudiantes que desarrollaron sus prácticas en horario nocturno, adaptándose a las condiciones laborales y personales de los participantes.



Figura 5. Graciela Scavone en la despedida realizada por sus compañeros del IPA en oportunidad de su jubilación (13/12/2014). De arriba hacia abajo y de izquierda a derecha: Alicia Acland, Guzmán Trinidad, Francisco Echegorri, Adriana Romano, Andrea Cabot, Pablo García, Stelio Haniotis, Lidia Díaz, Alejandro Villamil, Silvia Sguilla, Gustavo González, Adriana Durquet, Adriana Echarte, Graciela Scavone, Ismael Núñez, Carolina Pereira, Estrellita Lorier, Álvaro Suárez, Leonardo Machín, Alejandra Delgado, Álvaro De Souza, Daniel Baccino. Créditos: G. Scavone.

6. El impacto de los laboratorios en su trayectoria.

Entre 1990 y 1992 se desempeñó como ayudante preparadora en la órbita del CES, en el Liceo N°2 Héctor Miranda, en un contexto de trabajo colectivo altamente enriquecedor. Destaca nuevamente la influencia de colegas como Zamalvide -quien era coordinador del área-, junto a Alicia del Cioppo y Julio Basualdo, con quienes conformó un equipo sólido centrado en mejorar los aprendizajes de los estudiantes.

En este rol, el laboratorio se convirtió en un espacio clave tanto para la enseñanza como para su propia formación. Bajo la guía de Zamalvide, profundizó en el trabajo experimental articulado con la teoría, incorporando una mirada más rigurosa y cercana a la práctica científica. Esta experiencia fortaleció su dominio disciplinar y didáctico.

Uno de los principales desafíos fue superar la baja motivación de los estudiantes para preparar exámenes. Frente a esto, desarrollaron estrategias innovadoras, como recorrer las clases para invitar activamente a los alumnos al laboratorio como espacio de apoyo. Esta iniciativa generó una respuesta creciente: los estudiantes comenzaron a asistir en gran número, apropiándose del espacio, trabajando de forma colaborativa, y compartiendo materiales y resoluciones.

“Nuestra gran preocupación era cómo lograr que los estudiantes se pusieran a estudiar para los exámenes. Eso fue todo un desafío y le encontramos la vuelta... Después se quedaban a vivir en el laboratorio.”

El laboratorio pasó a ser un ámbito de trabajo y conocimiento colectivo, donde los propios estudiantes se ayudaban entre sí, construyendo una dinámica autónoma de aprendizaje. Esta experiencia le permitió observar procesos de cambio y evolución en los alumnos, lo que resultó profundamente significativo en su trayectoria.

Entre 1996 y 2012 se desempeñó como profesora de laboratorio en el IPA, etapa en la que consolidó una intensa actividad docente, de gestión y de formación continua. Comenzó a trabajar junto a un equipo inicial con Silvia Sguilla, Alejandro Villamil y Ricardo Yelpe. Desde el inicio, el laboratorio se encontraba en proceso de reorganización tras reformas edilicias, lo que implicó tareas de ordenamiento, clasificación de materiales y puesta en funcionamiento del espacio.

Durante esta etapa, participó en múltiples instancias institucionales y académicas, incluyendo comisiones de materiales de laboratorio, tribunales y espacios de coordinación con organismos como el Consejo Directivo Central (CODICEN). Su trabajo se caracterizó por una fuerte vinculación con otras instituciones y actores, lo que le permitió articular experiencias entre distintos ámbitos educativos y científicos.

Uno de los hitos fue la adquisición de equipamiento informático para el laboratorio, incluyendo computadoras, interfaces y sensores, lo que significó un cambio sustancial en las condiciones de trabajo y en las posibilidades de enseñanza

experimental. Asimismo, promovió la apertura del laboratorio como espacio activo, especialmente en horarios extendidos, incentivando la participación estudiantil, la consulta libre y el uso de una biblioteca de apoyo para estudiantes.

Paralelamente, continuó su formación en la Facultad de Ciencias, lo que le permitió integrar conocimientos teóricos y experiencias de investigación a su práctica docente. También participó en cursos de profundización, instancias de evaluación y actividades académicas que enriquecieron su perspectiva pedagógica.

En el plano institucional, integró el Consejo Asesor y Consultivo (CAC), participó en delegaciones a instancias gremiales y contribuyó a la organización de eventos académicos de gran escala, como la muestra del “Año Mundial de la Física” en 2005, que involucró a estudiantes, docentes y diversas áreas científicas.

Entre 2006 y 2009 se desempeñó como coordinadora del laboratorio de Física del IPA, etapa en la que asumió responsabilidades vinculadas tanto a la gestión institucional como al desarrollo académico. En ese período participó activamente en la Asamblea Técnico Docente (ATD) y en la elaboración del nuevo plan de Formación Docente, implementado en 2008. Este trabajo implicó la integración de comisiones y la articulación entre distintos actores institucionales, incluyendo representantes del IPA, de los Centros Regionales de Profesores (CeRP) y del Profesorado Semipresencial, con el objetivo de consensuar y diseñar una propuesta curricular común.

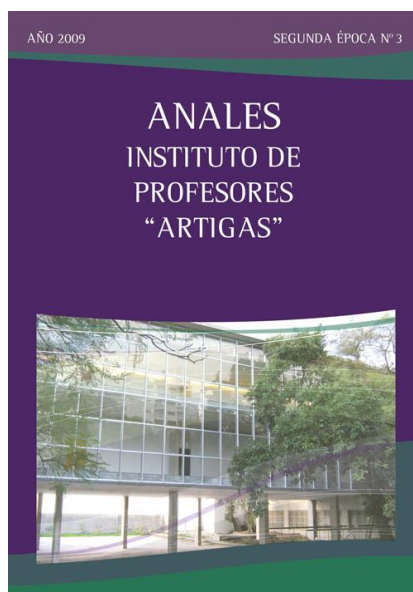


Figura 6. Portada de Anales del Instituto Profesores “Artigas” año 2009, Segunda Época N°3.

En paralelo, impulsó la participación del equipo del laboratorio en iniciativas de investigación en didáctica de las ciencias. Junto con colegas como Villamil, Sguilla y Delgado, concibió y desarrolló un proyecto de investigación titulado “Señales: una mirada sobre los desafíos que enfrentan los docentes de Ciencias Físicas en su práctica” [14], centrado en la enseñanza de la Física en cursos de primer año de Ciclo Básico del CES. El proyecto fue aprobado y desarrollado en liceos, mediante el trabajo directo con docentes de la asignatura Ciencias Físicas, a quienes se les propusieron lineamientos y reflexiones sobre planificación y evaluación.

Si bien el proyecto no fue finalmente seleccionado para su publicación en los canales formales de difusión, sí quedó registrado en los Anales del IPA (2009) en formato de síntesis, lo que permitió documentar la experiencia y sus resultados.

7. La Inspección de Física.

Entre 1992 y 1995 se desempeñó como inspectora de Física en el CES, tras haber sido convocada por la Inspección debido a su experiencia en ciclo básico y su formación académica. Su ingreso respondió a una necesidad institucional de contar con perfiles de mayor trayectoria en ese nivel educativo.

Al integrarse, trabajó con Juan Pedro Tinetto, Amanda Tizze, Tomás Ashfield y César Bernasconi, quienes la apoyaron en su incorporación. Participó en salidas de inspección a liceos, organización de visitas a docentes y coordinación de actividades en distintos puntos del país. La tarea implicaba planificación, evaluación y acompañamiento del trabajo docente en territorio, en un contexto donde aún no existían herramientas digitales.

Con el tiempo, asumió mayores responsabilidades dentro del equipo inspector, especialmente tras la jubilación sucesiva de los otros integrantes del cuerpo, quedando a cargo de múltiples áreas. Entre sus funciones se destacan la coordinación con grupos de ayudantes preparadores, la participación en comisiones de materiales y programas, y el trabajo con el CES para la elaboración de propuestas formativas.

Uno de los aportes más relevantes de esta etapa fue su participación en la promoción del uso de libros de texto en la enseñanza de la Física. Impulsó, junto con otros colegas, la incorporación de materiales accesibles para estudiantes, defendiendo la necesidad de estructurar la enseñanza en torno a textos que aseguraran coherencia y continuidad pedagógica. Esta iniciativa incluyó la difusión de textos como “Física General con experimentos sencillos” de Máximo &

Alvarenga y “Fundamentos de Física” de Blatt, y generó cambios en las prácticas docentes a nivel nacional.

Asimismo, participó junto con la comisión de programas de la Inspección de Física en el desarrollo de programas innovadores, como la llamada “microexperiencia” (Plan 1993), que introdujo una unidad de proyectos en el currículo del curso de Física de 4to año (1° BD). Esta propuesta fue posteriormente extendida a nivel nacional, marcando un cambio significativo en la enseñanza de la Física al promover el trabajo experimental y la autonomía estudiantil.

Su experiencia en la inspección se caracterizó por una intensa actividad institucional, trabajo colaborativo, gestión territorial y participación en transformaciones pedagógicas relevantes dentro del sistema educativo uruguayo.

8. El proyecto PROCENCIA.



Figura 7. Portada de PROCENCIA Memoria de trabajo 2011-2014

El proyecto “Estímulo a la cultura científica y tecnológica” PROCENCIA (2010-2014) [15] surgió en el marco de políticas de articulación entre ANEP y Udelar, con financiamiento específico y una comisión interinstitucional encargada de su coordinación. La entrevistada integró el equipo como Coordinadora de Gestión junto a representantes académicos y de distintos subsistemas educativos (CEIP, CES, CETP y CFE), en una estructura reducida, con baja burocracia y trabajo colaborativo.

El objetivo central del programa fue promover proyectos educativos y de investigación en ciencias

desde niveles preescolares hasta formación docente, en todo el país, mediante convocatorias abiertas. Los proyectos eran diseñados en función de necesidades planteadas por inspectores y docentes, priorizando el apoyo en contenidos disciplinares y respetando la autonomía pedagógica de los equipos locales. Se financiaban actividades, traslados y materiales, garantizando la implementación efectiva en territorio.

“Increíble. Eso para mí fue animarme a hacer cosas que no existían, porque no existían. Yo había vivido tantas cosas que se hicieron y desaparecieron, y en ese momento dije esto hay que escribirlo y... está escrito.”

Uno de los aspectos más relevantes fue la exigencia de que los proyectos involucraran directamente a estudiantes, generando experiencias de aprendizaje significativo. Entre los ejemplos destacados se encuentra el trabajo sobre la contaminación del arroyo Manga, desarrollado por estudiantes del liceo N°25 “José Belloni” de Montevideo, quienes realizaron salidas de campo, recolección de muestras y análisis en la Facultad de Ciencias, culminando en presentaciones públicas de sus resultados. Estas instancias incluyeron reconocimiento formal mediante diplomas, valorados como un estímulo importante para los estudiantes.

El programa también permitió integrar estudiantes de formación docente en proyectos de investigación, así como realizar pasantías en instituciones científicas como el Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA), el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU) y el Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (IIBCE). Estas experiencias fomentaron la vinculación entre educación y ciencia, y el trabajo interdisciplinario.

PROCENCIA favoreció además la creación de redes entre instituciones, docentes e investigadores, generando impactos que trascendieron los proyectos iniciales. Si bien enfrentó tensiones políticas y dificultades de visibilidad pública, constituyó una experiencia significativa de articulación educativa a nivel nacional, destacando el potencial del trabajo colaborativo y la educación basada en proyectos.

Este proyecto significó una experiencia clave de aprendizaje, articulando su rol docente con la gestión, incluyendo el desarrollo del trabajo colaborativo que la caracterizó como ha quedado en evidencia, y la toma de decisiones en contextos complejos. Asimismo, reafirmó su compromiso con una educación científica situada, participativa y vinculada al territorio.

9. Conclusiones

Nuestro país, cuya nación se originó a partir de una mezcla de nativos, inmigrantes españoles, italianos y franceses, sumados a las personas que fueron forzadas a dejar sus orígenes para ser esclavizadas aquí, siempre ha mirado al mundo para aprender, mirar, admirar e imitar modelos. En ese proceso, muchas veces ha relegado sus propias historias, saberes y referentes, subestimando la riqueza de experiencia acumulada.

El 16 de julio de 1950, en el estadio Maracaná de Rio de Janeiro, Brasil, y contra todo pronóstico, — incluyendo el de los dirigentes de la AUF de entonces— la selección uruguaya de fútbol obtiene el título de campeón del mundo frente al equipo local, dejando mudos a 200.000 espectadores y llorando a todo un país. Esta hazaña es recordada como una de las más sorprendentes de la historia de este deporte. Este hito marcó nuestra identidad de tal forma, que aún hoy, los niños, jóvenes, y sus familias, sueñan con el éxito del gol y apuestan tiempo, recursos y energías en un objetivo que solo pocos alcanzan: solo el 5% llega a jugar en primera, apenas el 1% alcanza la élite y un escasísimo 0,14 % logra mantenerse en ella [16].

Este lugar predominante del fútbol en nuestra cultura tiene consecuencias concretas. Al concentrar la idea de éxito en un ámbito tan restringido, se instala una forma de interpretar el fracaso. Cuando el objetivo no se alcanza, como sucede en la enorme mayoría de los casos, con frecuencia se le atribuye a explicaciones externas o circunstanciales que evitan una reflexión más profunda. Cuesta asumir que muchas veces, la diferencia entre unos y otros no radica en la mala suerte ni en factores ajenos, sino en no haber logrado destacarse, en permanecer dentro de lo esperable para ello, siendo uno más entre tantos.

Sin embargo, existen muchos “Maracanazos” conocidos y aún por conocer en este pequeño gran país. Y cada uno de ellos cuenta con su Jacinto Obdulio “Negro jefe” Varela, el capitán de aquella selección gloriosa que se rebeló e indignó ante el pedido de los dirigentes de “no perder por más de cuatro goles”; con su Eladio Dieste en arquitectura, María Noel Ricetto en ballet, Clemente Estable en biología, Rafael Radi en bioquímica, Rodolfo Gambini en física, Abel Carlevaro en guitarra clásica, José Luis Massera en matemática, Joaquín Torres García en pintura, entre muchos otros.

También en la docencia se reproduce esta tensión. Existieron y existen educadores que, al igual que estos referentes, asumen el desafío de ir más allá de lo dado, que cuestionan sus prácticas, innovan, se comprometen con su desarrollo profesional y generan impactos reales en sus estudiantes.

Pero para transmitir a las nuevas generaciones el hecho de que cada actividad, incluida la nuestra, tiene

referentes en los cuales vale la pena reflejarse, gigantes que nos ofrecen sus hombros [17] para que consideremos apoyarnos para ver más lejos, es nuestra responsabilidad documentar y difundir sus trayectorias profesionales. Recuperarlas no solo permite valorizar nuestra historia, sino también establecer estándares más exigentes frente a la tentación de la conformidad.

Este trabajo es un intento de comenzar esa tarea: conocer y reconocer a nuestros y nuestras colegas destacadas para que sus logros sean evaluados por los docentes noveles como referencias para definir sus propios caminos, en el acuerdo o en la discrepancia, y de esa forma evitar en lo posible “reinventar la rueda pinchada” al decir de Alan Kay [18].



Figura 8. Profesora Graciela Scavone. Créditos: G. Scavone.

10. Consentimiento informado

Se declara que la profesora Graciela Scavone fue informada sobre el propósito del artículo, tuvo oportunidad de revisar el texto, y consintió su publicación.

11. Referencias

- [1] A. Parrella, Huellas uruguayas en la enseñanza de la física, [Educación en Física 7\(3\), 3-33 \(2006\)](#).
- [2] Z. Viera & M. Castelnoble, Diálogo con el Ing. Rafael Guarga, *Educación en Física* 2(1), 24-26, (1995).
- [3] (s/d), El Dr. Rodolfo Gambini, *Educación en Física* 2(2), 31, (1995).
- [4] Z. Viera & M. Garcimartín, Rayos X: 100 años, *Educación en Física* 2(2), 27-30, (1995).
- [5] M. Garcimartín, Entrevista a Ramón Méndez Galain, *Educación en Física* 2(4), 16-19, (1996).
- [6] M. Garcimartín & M. Castelnoble, Primer Congreso de Gravedad Cuántica en Punta del Este, *Educación en Física* 2(4), 3-15, (1996).

- [7] M. Garcimartín, Entrevista al Dr. Mario Wschebor. Decano de la Facultad de Ciencias, Separata de Educación en Física 3 (¿?), (1997).
- [8] M. Maxera, Roberto Markarian, Educación en Física 4(1), 16-18, (1998).
- [9] M. Marroig, Entrevista al Dr. Marcelo Barreiro, [Educación en Física 8 \(1\), 25-36 \(2011\)](#).
- [10] I. Acland, Entrevista al Dr. Ismael Núñez, [Educación en Física 8 \(2\), 59-63 \(2012\)](#).
- [11] A. Parrella, PCF Radio - Archivo, <https://aparrella.wordpress.com/pcf-radio-archivo/> (s.f.).
- [12] F. Casais & G. Trinidad, “Sé que me quieres aquí, pero puedo ser mamá a tiempo parcial o una loca a tiempo completo”. Abordaje de la física y la enseñanza de la física como profesiones desde una perspectiva de género, [Educación en Física 39, 32-44 \(2025\)](#).
- [13] F. Brito & G. Trinidad, Cronología histórica de la Asociación de Profesores de Física del Uruguay (A.P.F.U.), [Educación en Física 7\(3\), 34-48 \(2006\)](#).
- [14] A. Delgado, G. Scavone, S. Sguilla & A. Villamil, Señales: una mirada sobre los desafíos que enfrentan los docentes de Ciencias Físicas en su práctica, en *Anales del Instituto Profesores Artigas*, editado por la Administración Nacional de Educación Pública (ANEP, Montevideo, 2009), pp. 165-184.
- [15] Administración Nacional de Educación Pública, *Prociencia: memoria de trabajo 2011-2014*. (ANEP, CODICEN, PROCIENCIA, Montevideo, 2015)
- [16] El País, “A la elite del fútbol llega 1,4 cada 1.000 niños”, dice Garay, DT de las inferiores de la selección durante más de 10 años, elpais.com.uy/informacion/sociedad/a-la-elite-del-futbol-llega-1-4-cada-1-000-ninos-dice-garay-dt-de-las-inferiores-de-la-seleccion-durante-mas-de-10-anos (2022).
- [17] R. K. Merton, *On the shoulders of giants: a Shandean Postscript*, (Chicago University Press, Chicago, 1993).
- [18] Ceibal, Movilización social para CEIBAL. Miradas al contexto nacional e internacional de proyectos de un computador por niño, <https://capacidad.es/Ceibalmovilizacion-social.pdf>, (2010).



Estudio experimental del movimiento individual y la dinámica colectiva de hormigas en confinamiento.

Lautaro Gutiérrez Echenique¹, Naomi Nieves Rocha¹, Caracé Gutiérrez¹

¹Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

E-mail: lautaro.gutierrez@fcien.edu.uy, naomi.nieves@fcien.edu.uy

(Recibido el 5/4/2026, aceptado el 3/6/2026)



Resumen

El estudio de movimientos es una parte importante de la física y de su enseñanza. Es tradicional el análisis de trayectorias de materia inactiva; por ejemplo, objetos que caen o giran, abordados mediante un enfoque principalmente analítico basado en las ecuaciones que describen el movimiento. Sin embargo, es menos común el estudio de materia activa —materia que utiliza energía interna para su movimiento— para el que resulta de difícil implementación el enfoque analítico. Por esto, en el presente trabajo se propone un montaje experimental sencillo que permite el estudio de la dinámica de hormigas en confinamiento. Mediante rastreo de trayectorias y conteo de individuos en distintas configuraciones, se discuten semejanzas y contrastes con modelos clásicos de partículas pasivas. A partir de los resultados experimentales, se observa que el movimiento individual de las hormigas presenta desviaciones significativas respecto del movimiento browniano clásico. No obstante, a nivel colectivo, el sistema exhibe dinámicas compatibles con procesos difusivos: en particular, se observa una relajación hacia el equilibrio cuya escala temporal depende tanto del tamaño de la abertura entre compartimentos como del número de individuos. Se argumenta que un abordaje estadístico complementa y enriquece la enseñanza tradicional de la cinemática, al proveer contextos reales donde el movimiento no responde a una única ecuación sino a distribuciones y tendencias. El trabajo busca mostrar que la materia activa, como las cotidianas hormigas, es un recurso valioso para acercar un modo diferente de pensar el movimiento, más cercano a la física estadística y la complejidad.

Palabras clave: Movimiento browniano, hormigas, difusión.

Abstract

The study of motion is an important part of physics and its teaching. The analysis of trajectories of inactive matter is traditional; for example, objects that fall or rotate, approached through a mainly analytical framework based on the equations that describe motion. However, the study of active matter —matter that uses internal energy for its motion— is less common, for which the analytical approach is difficult to implement. For this reason, in this work a simple experimental setup is proposed that allows the study of the dynamics of ants under confinement. Through trajectory tracking and counting of individuals in different configurations, similarities and contrasts with classical models of passive particles are discussed. From the experimental results, it is observed that the individual motion of ants presents significant deviations from classical Brownian motion. Nevertheless, at the collective level, the system exhibits dynamics compatible with diffusive processes: in particular, a relaxation towards equilibrium is observed whose time scale depends both on the size of the opening between compartments and on the number of individuals. We argue that a statistical approach complements and enriches the traditional teaching of kinematics, by providing real contexts where motion does not respond to a single equation but to distributions and trends. This work aims to demonstrate that active matter, such as ants in everyday settings, is a valuable resource for approaching a different way of thinking about motion, more closely aligned with statistical physics and complexity.

Keywords: Brownian motion, ants, diffusion.

1. Introducción

El estudio del movimiento constituye un pilar fundamental de la física y su enseñanza. Tradicionalmente, este análisis se ha centrado en trayectorias de materia inactiva, donde el enfoque es principalmente analítico y basado en ecuaciones cinemáticas clásicas. Sin embargo, resulta menos común el estudio de la materia activa, compuesta por agentes que consumen energía interna para sostener su desplazamiento. La descripción física de estos sistemas, situados en el marco de la física fuera del equilibrio, requiere modelos que consideren la autopropulsión y las fluctuaciones estocásticas, como se observa en la hidrodinámica de la materia blanda [1] y en los marcos teóricos de autoorganización y dinámica browniana activa [2, 3].

Las hormigas constituyen un sistema experimental especialmente interesante para explorar estas ideas. Gran parte de la literatura se ha centrado en contextos ecológicos específicos —como el forrajeo, la formación de senderos o la selección de rutas— en los que las feromonas y las interacciones sociales desempeñan un papel dominante [4, 5, 6] y donde las reglas de movimiento individual desencadenan efectos colectivos no lineales [7]. No obstante, desde una perspectiva física, los individuos también pueden modelarse como agentes activos sometidos a ruido interno y a interacciones con el entorno, planteando una analogía entre el comportamiento de estos insectos y la dinámica molecular [8]. En ausencia de señales externas dominantes, su movimiento puede analizarse en términos puramente cinemáticos y estadísticos [9].

En este contexto, diversos trabajos han investigado la navegación individual de hormigas en entornos simples o desconocidos. En particular, estudios experimentales han mostrado que, a escalas apropiadas, el desplazamiento de ciertas especies puede aproximarse mediante modelos difusivos. Charoonratana y colaboradores, al analizar la navegación de la hormiga *Oecophylla smaragdina* en un ambiente simple y no familiar, concluyeron que su movimiento puede describirse adecuadamente mediante un proceso browniano [10].

A pesar de eso, el carácter estrictamente browniano del movimiento en organismos vivos sigue siendo una cuestión abierta. Las trayectorias reales suelen presentar correlaciones temporales, variabilidad interindividual y efectos de confinamiento que pueden producir desviaciones respecto del modelo ideal. En particular, la presencia de fronteras modifica la dinámica mediante colisiones, cambios de orientación y acumulación en paredes, fenómenos ampliamente estudiados en sistemas de materia activa [1, 3, 10]. Por

este motivo, experimentos en arenas controladas resultan especialmente útiles para evaluar en qué medida una descripción browniana es válida.

Diferentes modelos teóricos han sido propuestos para describir el movimiento de hormigas, incluyendo partículas brownianas activas [2, 3], caminatas aleatorias correlacionadas [11] y caminatas aleatorias reforzadas asociadas a la formación de senderos [12]. Sin embargo, el modelo browniano clásico constituye una primera aproximación particularmente útil [10] tanto por su simplicidad conceptual como por su capacidad para capturar propiedades estadísticas macroscópicas del sistema.

En este trabajo investigamos experimentalmente la dinámica de hormigas recolectadas en estado salvaje dentro de arenas diseñadas para controlar la geometría del sistema y minimizar estímulos externos específicos. A diferencia de estudios centrados en colonias establecidas, aquí se analizan individuos aislados de su contexto ecológico, lo que permite aproximarse a su locomoción intrínseca como agentes activos autónomos. El dispositivo experimental desarrollado permite estudiar tanto las trayectorias individuales como la redistribución colectiva de los individuos entre distintas regiones del espacio.

Nuestra hipótesis inicial es que, en ausencia de señales externas dominantes, el movimiento de las hormigas en este entorno puede describirse aproximadamente como un proceso browniano. Bajo esta hipótesis, el sistema debería exhibir difusión espacial y relajación hacia un estado estacionario análogo al observado en sistemas de partículas pasivas entre recipientes conectados. No obstante, debido a la naturaleza activa de los organismos, es esperable que surjan desviaciones respecto de este modelo ideal, particularmente a escalas temporales cortas o en presencia de confinamiento.

El objetivo de este trabajo es evaluar experimentalmente la validez de esta hipótesis y caracterizar las diferencias entre la dinámica observada y la predicha por un modelo puramente browniano. En particular, analizamos si la complejidad microscópica del movimiento individual impide una descripción difusiva, o si, por el contrario, el comportamiento colectivo puede aproximarse mediante leyes estadísticas simples.

Más allá de su interés conceptual para la física de sistemas fuera del equilibrio, el sistema experimental presentado es simple, reproducible y de bajo costo, lo que lo convierte en una plataforma accesible para estudiar materia activa biológica en condiciones controladas. Los resultados permiten evaluar hasta qué punto el movimiento de organismos vivos puede

describirse mediante modelos estocásticos y aportan evidencia sobre el papel de la autopropulsión y el confinamiento en la emergencia de dinámicas colectivas.

2. Fundamento teórico

En concordancia con las dos escalas en que se desarrolló el trabajo experimental, el fundamento teórico se estructura en dos subsecciones: la primera asociada a la dinámica individual y la segunda asociada a la dinámica colectiva.

2.1. Movimiento browniano

El *movimiento browniano* es el movimiento aleatorio de partículas pequeñas suspendidas en un fluido. Fue observado por el botánico Robert Brown en 1827, que vio partículas de polen moverse erráticamente sobre el agua bajo su microscopio (ver figura 1), pero aunque sabía que no se trataba de partículas vivas, no supo explicar su origen [13]. La explicación física de este fenómeno la brindó Einstein en 1905 [14]. Concluyó que este movimiento se debe a que una partícula sólida está sometida a múltiples choques por el movimiento de las moléculas del fluido, lo que resulta en una fuerza neta. Debido a su tamaño y masa reducidos, los impactos individuales, aunque son aleatorios, producen fluctuaciones apreciables en su posición, de modo que el desplazamiento resultante es visible en un microscopio [15].

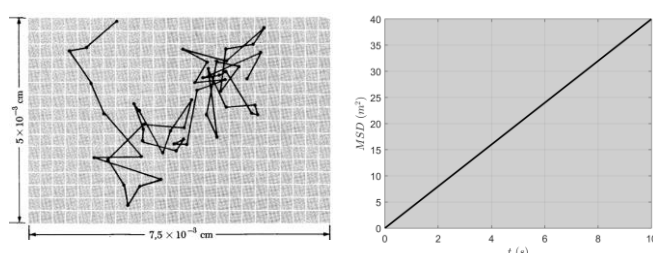


Figura 1. Movimiento browniano. [Izquierda] Movimiento browniano de una partícula sólida, de 10^{-4} cm de diámetro, suspendida en agua y observada a través de un microscopio, en intervalos de 30 segundos. [Datos de J. Perin, Atoms, p. 35, en [15]]. [Derecha] Desplazamiento cuadrático medio (MSD) de una partícula con un movimiento aleatorio.

Para un movimiento aleatorio en dos dimensiones, Einstein determinó que el desplazamiento cuadrático medio, magnitud que permite cuantificar la extensión espacial de un movimiento aleatorio, se relaciona con el tiempo de manera lineal (ver figura 1), esto es

$$\langle \Delta r^2(t) \rangle = 4Dt \quad (\text{Ec. 1})$$

donde D es un coeficiente que depende de las características del medio y la partícula y t es el tiempo [14].

2.1. Difusión de partículas

Si tenemos un recipiente con aire en equilibrio térmico e introducimos una pequeña cantidad de un nuevo gas, el gas comenzará a extenderse por todo el recipiente, pero lo hará lentamente debido a la presencia del aire. Este proceso de expansión se denomina *difusión* [13]. La difusión está controlada principalmente por las moléculas del gas que se desplazan entre sí por las moléculas del aire de fondo. Después de muchas colisiones, las moléculas terminan distribuyéndose de forma más o menos uniforme por todo el recipiente [13]. Desde el punto de vista de la física estadística, este sistema aislado que se encuentra inicialmente en un estado poco probable tenderá con el tiempo a configuraciones más probables, de mayor desorden (salvo pequeñas fluctuaciones), alcanzando finalmente el estado de equilibrio, ya que cada partícula se mueve aleatoriamente [15].

Una representación de un proceso de difusión se muestra en la figura 2, donde N partículas de un gas inician en una mitad, y tras retirar una barrera se expanden en todo el recipiente. El tiempo en el que se alcanzan $\frac{1}{2}N$ partículas en cada lado se denomina tiempo de relajación, τ_r [15].

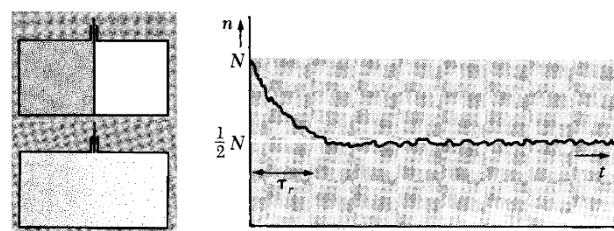


Figura 2. Difusión. [Izquierda] Representación de la difusión de un gas. Cuando se retira repentinamente la pared todas las partículas que estaban concentradas en la mitad izquierda comienzan a difundirse. [Derecha] Gráfica esquemática del número n de partículas en la mitad izquierda de la caja en función del tiempo t , empezando en el instante inmediatamente después de haber retirado la pared. Se indica el tiempo de relajación τ_r [15].

3. Montaje experimental y métodos

En esta sección se describen los dispositivos y procedimientos utilizados para analizar la dinámica de hormigas tanto a nivel individual como colectivo. Para esto, se utilizaron especímenes correspondientes a

hormigas silvestres recolectadas en la zona costera del departamento de Canelones (Uruguay). A partir de una guía de identificación taxonómica [16], se determinó que los individuos pertenecen al género *Camponotus* sp. Los experimentos se realizaron a temperatura ambiente (aproximadamente 25 °C) bajo iluminación natural ambiente. Antes de cada realización experimental, utilizando papel secante y alcohol se limpiaron los recintos con el fin de eliminar restos de feromonas.

El registro de los desplazamientos se llevó a cabo mediante una cámara ubicada cenitalmente, grabando en 1080p a 30FPS. Posteriormente, se extrajeron las trayectorias bidimensionales calibrando las dimensiones de la arena y utilizando la herramienta de rastreo automático del software Tracker [17].

3.1. Configuración para el estudio de la dinámica individual

Para el estudio del movimiento individual, se diseñó e implementó un dispositivo experimental, que consiste en un recinto cuadrado de base sólida de $(21,0 \pm 0,5)$ cm de lado, delimitado por un perímetro de agua para asegurar el confinamiento de las hormigas en el área de estudio (ver figura 3). Se registraron trayectorias de hormigas aisladas, $N = 1$, y de una hormiga en el mismo recinto en interacción con otra, $N = 2$.

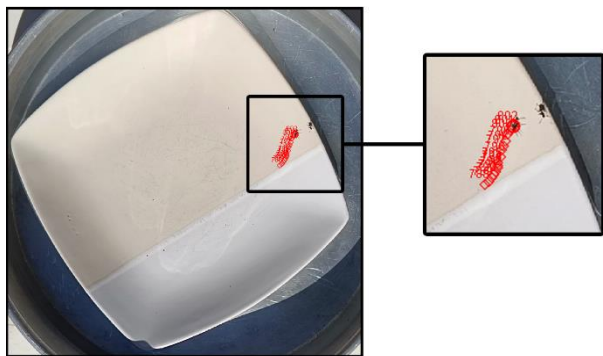


Figura 3. Montaje experimental correspondiente al estudio de la dinámica individual de una hormiga aislada y en interacción con otra. En rojo, la trayectoria registrada mediante videoanálisis.

3.2. Configuración para el estudio de la dinámica colectiva

Para el estudio del comportamiento colectivo se montó un dispositivo análogo al de la figura 2. Se utilizó un recinto de $(40,0 \pm 0,5)$ cm $\times$ $(30,0 \pm 0,5)$ cm de base y $(1,0 \pm 0,1)$ cm de altura, lo que permite considerar que se trata de un movimiento en dos

dimensiones. Se inició con el total de hormigas N en una mitad del compartimento, limitadas por una barrera (ver figura 4).

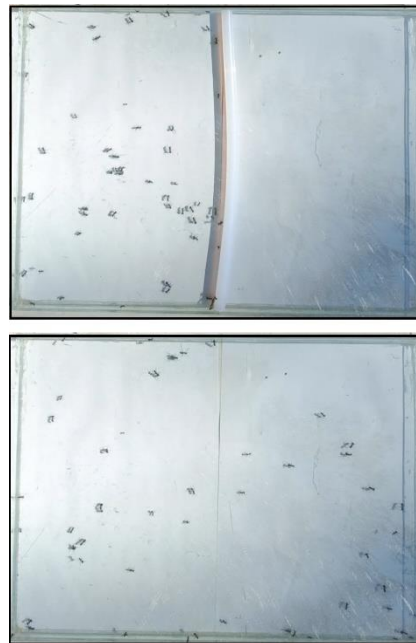


Figura 4. Montaje experimental, en analogía con el descrito en la figura 2, para el estudio de las dinámicas colectivas.

Por un lado, se realizaron registros eliminando la barrera completamente para $N = 21$ y para $N = 50$; por otro lado, se registró dejando una abertura de $l = (5,0 \pm 0,3)$ cm entre una mitad y otra para $N = 28$ y para $N = 53$. A partir de los registros, se contabilizó el número de individuos en un compartimento en función del tiempo. Asimismo, se analizó el movimiento individual de una hormiga elegida arbitrariamente en dinámica colectiva, para contrastar con las estudiadas con el primer montaje.

3.3. Métodos

Para caracterizar la dinámica estocástica a nivel individual, el promedio sobre múltiples partículas simultáneas (promedio de ensamble) empleado en los modelos clásicos de difusión no es directamente aplicable. En su lugar, la literatura científica contemporánea demuestra que, al estudiar sistemas biológicos de materia activa, el cálculo del Desplazamiento Cuadrático Medio Temporal resulta ser el enfoque necesario y válido para analizar estas trayectorias [18].

En este trabajo, dicho cálculo se realizó implementando el método de ventanas de tiempo deslizantes sobre la trayectoria completa registrada para cada individuo. Este enfoque empírico, propio de

las técnicas de seguimiento de partículas individuales, permite cuantificar la dispersión intrínseca del animal a distintas escalas de tiempo y contrastarla adecuadamente con los regímenes teóricos difusivos. Cabe aclarar que, en lo sucesivo, toda mención al desplazamiento cuadrático medio (o simplemente MSD) en este estudio hace referencia estricta a este cálculo temporal.

En la práctica, para cada separación fija entre posiciones de una misma trayectoria, se consideraron todos los pares de puntos disponibles separados por dicho intervalo, se calculó el cuadrado de la distancia entre ellos y luego se promedió sobre todos los instantes iniciales posibles. De este modo, el desplazamiento cuadrático medio queda estimado para cada escala temporal a partir de un barrido sistemático de toda la trayectoria.

4. Resultados

En esta sección se exponen los resultados del análisis cinemático y estadístico de las trayectorias de las hormigas. Para abordar la complejidad del sistema, el análisis se estructura en dos escalas complementarias: en primer lugar, se caracteriza la dinámica individual para contrastar su comportamiento con el movimiento browniano clásico; y, en segundo lugar, se analiza la dinámica colectiva para evaluar la emergencia de fenómenos de transporte análogos a la difusión macroscópica y la relajación hacia el equilibrio.

4.1. Dinámica individual: ¿hormigas brownianas?

En la figura 5 se presentan los resultados para las dinámicas individuales. La fila **a** corresponde a una hormiga aislada ($N = 1$) desplazándose bajo las condiciones del montaje de la fig. 3, mientras que la fila **b** muestra el caso de una hormiga en el mismo recinto, pero en interacción con otra ($N = 2$). La fila **c** presenta el movimiento de una hormiga perteneciente a un conjunto de $N = 50$ individuos, en el montaje de la fig. 4. En cada caso se muestran la trayectoria dentro del recinto, el histograma de posiciones y el desplazamiento cuadrático medio, organizados respectivamente en las columnas **1**, **2** y **3**. Como se evidencia en las columnas 1 y 2 de la figura 5, las hormigas exhiben una marcada tendencia a desplazarse siguiendo los bordes del recinto y a permanecer estáticas en un mismo punto durante intervalos de tiempos prolongados. Estas fluctuaciones abruptas en la dinámica del movimiento son consistentes con la literatura ecológica, donde se ha documentado que los individuos alternan entre fases de desplazamiento lineal rápido y fases de búsqueda local o inactividad temporal [19]. En nuestro montaje, al

tratarse de un entorno confinado y sin estímulos externos dominantes, esta alternancia biológica actúa —junto con las colisiones— como fuente de ruido estocástico predominante. Además, la preferencia por recorrer el perímetro del recinto es consistente con los resultados de Charoonratana y colaboradores [10], quienes modelaron la navegación de hormigas en entornos confinados y desconocidos, demostrando que la interacción con los límites físicos del espacio domina la trayectoria, reduciendo la probabilidad de exploración en el interior de la arena.

El análisis del desplazamiento cuadrático medio (MSD), presentado en la columna 3 de la fig. 5, revela que la dinámica en los tres casos estudiados difiere significativamente del movimiento browniano clásico, dado que no se observa una dependencia estrictamente lineal con el tiempo en todo el intervalo temporal. Esta no linealidad general es una característica inherente de los sistemas de materia activa y las partículas brownianas activas [1, 3]. A diferencia del movimiento browniano pasivo impulsado por fluctuaciones térmicas, los organismos vivos transforman energía interna para autopropulsarse, lo que se traduce en trayectorias con memoria direccional antes de alcanzar un posible régimen puramente difusivo. En este contexto, el MSD revela una fuerte dependencia de la dinámica individual respecto a la densidad poblacional.

La figura 5 muestra que para una hormiga aislada ($N = 1$, panel **a**₃) y en condiciones de mínima interacción ($N = 2$, panel **b**₃), el MSD exhibe marcadas oscilaciones a grandes escalas de tiempo. Estas fluctuaciones macroscópicas son características de trayectorias individuales en recintos cerrados, reflejando el confinamiento espacial: el individuo agota la longitud característica del área experimental y altera drásticamente su direccionalidad al interactuar balísticamente (mediante un movimiento persistente en línea recta) con los límites físicos del montaje. Por el contrario, cuando el individuo se encuentra inmerso en la dinámica colectiva de alta densidad ($N = 50$, panel **c**₃), las grandes oscilaciones desaparecen drásticamente, dando lugar a una curva de crecimiento suave y sostenido. Resulta interesante destacar que, para este caso, la gráfica exhibe un régimen de crecimiento aproximadamente lineal a escalas de tiempo cortas, específicamente hasta $t \approx 30$ s. Este fenómeno sugiere que el aumento en la frecuencia de interacciones interindividuales (colisiones e interacciones evasivas) actúa como una fuente de ruido estocástico análoga a la agitación térmica.

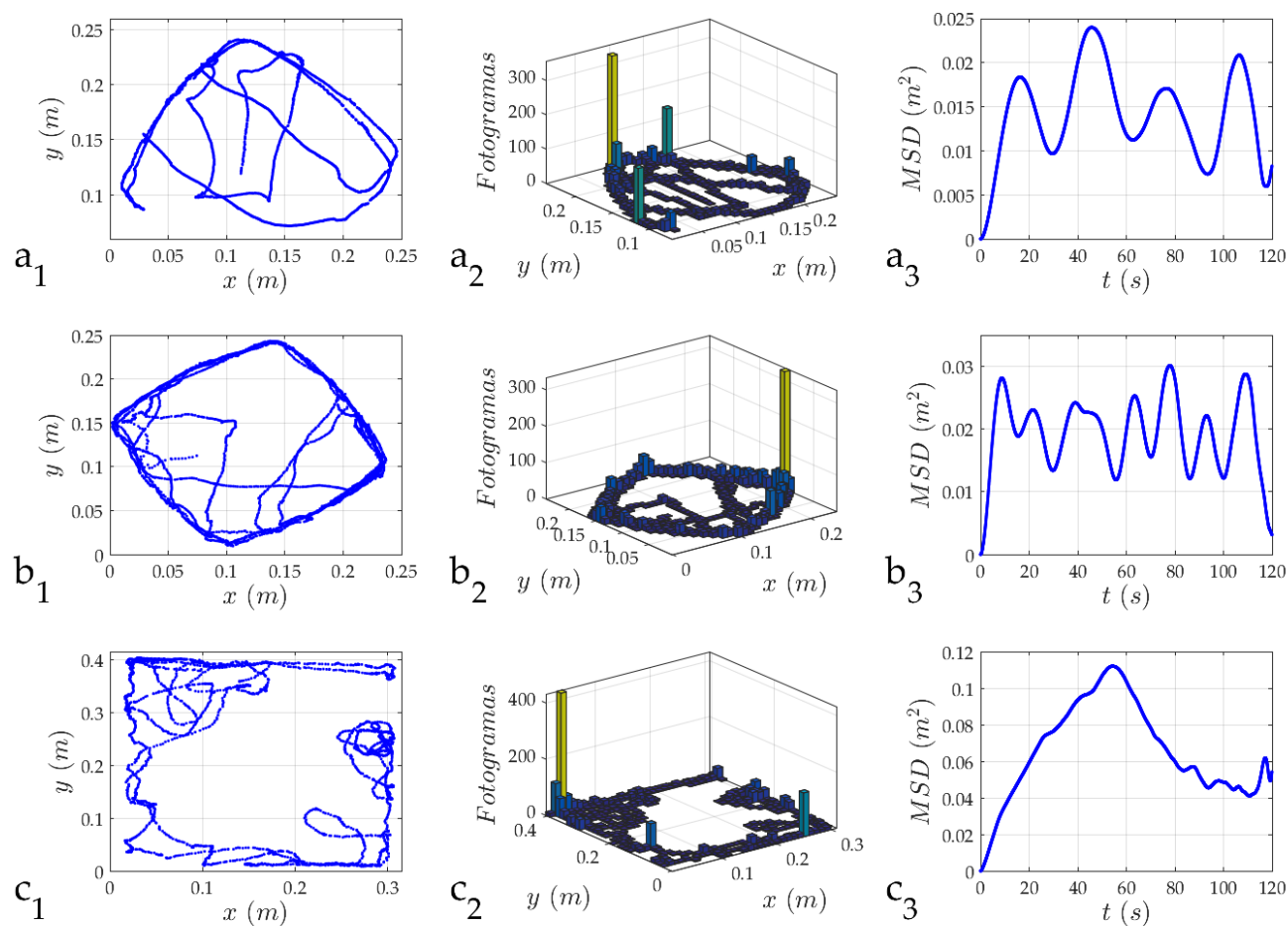


Figura 5. Trayectorias individuales de tres hormigas en diferentes contextos. La fila **a** corresponde a una hormiga aislada ($N = 1$) moviéndose en las condiciones del montaje de la fig. 3 y la fila **b** a una hormiga moviéndose en el mismo recinto en interacción con otra ($N = 2$). La fila **c** refiere a una hormiga dentro de un conjunto de $N = 50$, en el montaje de la fig. 4. Para cada caso se representa la trayectoria en el recinto (columna 1), el histograma de posiciones (columna 2) y el desplazamiento cuadrático medio (columna 3).

Las constantes interacciones interrumpen los recorridos prolongados de la autopropulsión, forzando una rápida pérdida de la memoria direccional e induciendo un régimen transitorio de tipo browniano a tiempos cortos. En este estado de alta densidad, las restricciones impuestas por la multitud dominan sobre el confinamiento de las paredes, homogeneizando la dinámica espacial del individuo a tiempos largos.

Cabe destacar que el cálculo del MSD mediante ventanas de tiempo deslizantes asume una hipótesis de estacionariedad que, como sugieren las oscilaciones en los casos de baja densidad, es una aproximación al comportamiento promedio. Estas fluctuaciones son intrínsecas al confinamiento y a la alternancia de regímenes (entre perimetral y central), por lo que el MSD debe interpretarse como una caracterización de la escala de persistencia y no como un proceso estocástico ideal. No obstante, la convergencia hacia curvas suaves

en el caso de $N = 50$ refuerza la validez del método para describir la dinámica colectiva.

4.2. Dinámica colectiva: ¿difusión?

En la fig. 6 se presentan los resultados para las dinámicas colectivas. Se grafican la cantidad de hormigas en una mitad, n , en función del tiempo t en segundos. Se observa que tras un tiempo de relajación, τ_r , el número oscila en torno al equilibrio, en $n = \frac{1}{2}N$. Se obtuvo que, en los casos donde la apertura es de $l = (5,0 \pm 0,3) \text{ cm}$, el tiempo de relajación $\tau_r = 335 \text{ s}$ para la realización con $N = 28$ y $\tau_r = 168 \text{ s}$ para la realización con $N = 53$. Por otro lado, cuando se elimina por completo la barrera, se obtuvo que $\tau_r = 15,0 \text{ s}$ con $N = 21$ y $\tau_r = 9,5 \text{ s}$ con $N = 50$. Se tomó τ_r como el tiempo en que se alcanza por primera vez $n = \frac{1}{2}N$.

Respecto a la dinámica colectiva, los resultados revelan una dependencia de τ_r con el grado de confinamiento (relacionado con la geometría y la densidad de individuos) impuesto. Al transicionar de una abertura de $l = (5,0 \pm 0,3) \text{ cm}$ a la eliminación total de la barrera, el sistema experimenta una reducción drástica en τ_r , pasando de escalas temporales del orden de cientos de segundos a apenas unos pocos segundos. A nivel macroscópico, este comportamiento presenta una profunda analogía con los procesos termodinámicos de difusión y expansión libre de un gas ideal, donde la tasa de flujo de partículas hacia el equilibrio estadístico (con fluctuaciones en torno a $\frac{1}{2}N$) está modulada directamente por la sección transversal de la abertura disponible [13]. Esta observación empírica es consistente con el enfoque de auto-organización propuesto por Detrain y Deneubourg [8], quienes muestran que estructuras colectivas pueden emerger a partir de interacciones locales entre individuos, sin la intervención de un control centralizado.

Sin embargo, la naturaleza intrínseca del sistema exige interpretar este flujo en términos de la materia activa. De acuerdo con los marcos teóricos establecidos [1, 3], a diferencia de las partículas pasivas, los organismos vivos inyectan energía a nivel local para autopropulsarse, generando lo que se conoce como presión activa. En presencia de la restricción espacial ($5,0 \text{ cm}$), el flujo migratorio de las hormigas se ve fuertemente limitado por un efecto de cuello de botella; en esta región, las interacciones estéricas (exclusión de volumen) y las colisiones entre individuos penalizan el tránsito, elevando el tiempo de relajación. Por el contrario, al suprimir la barrera, la presión activa colectiva facilita una rápida dispersión espacial, permitiendo que la dinámica de relajación del ensamble alcance su estado estacionario en una fracción mínima de tiempo, evidenciando cómo las restricciones del entorno dominan sobre la movilidad individual en sistemas confinados.

Las mediciones sugieren que el tiempo de relajación τ_r guarda una relación inversa tanto con el tamaño de la abertura l como con el número de individuos N . El primer comportamiento es consistente con los modelos de difusión donde el flujo de partículas es proporcional al área de tránsito disponible [13]. Por otro lado, la disminución de τ_r al aumentar N sugiere que la presión activa del sistema juega un rol crucial en la velocidad con la que el conjunto alcanza el equilibrio estadístico. Este fenómeno permite que la autopropulsión y la mayor frecuencia de intentos de paso de las hormigas superen incluso los efectos de exclusión de volumen que, en sistemas pasivos, ralentizarían el tránsito en aperturas estrechas [1, 3].

5. Conclusiones y perspectivas

A partir de los resultados obtenidos en este estudio, es posible caracterizar de forma detallada las dinámicas individuales y colectivas de las hormigas. En primer lugar, se observó que, aunque el desplazamiento de los individuos aislados presenta una apariencia aleatoria a simple vista, el análisis riguroso de sus trayectorias revela que estas contrastan de forma clara con el movimiento browniano clásico.

Sin embargo, a nivel macroscópico, el comportamiento colectivo de estos organismos muestra una profunda analogía con la difusión térmica de partículas en un gas. Se destaca que, aun cuando el movimiento a escala individual no sea estrictamente browniano, la dinámica del grupo en su conjunto exhibe características estadísticas fundamentales, como la relajación gradual hacia un estado de equilibrio estadístico.

Por otro lado, la sencillez del montaje experimental empleado convierte a este tipo de estudios empíricos en una herramienta sumamente accesible y reproducible, con un gran potencial tanto para el ámbito de la investigación como para la enseñanza. La utilización de un enfoque estadístico para analizar el movimiento de organismos vivos complementa los estudios cinemáticos tradicionales, enfatiza la riqueza de las dinámicas colectivas y funciona como un puente conceptual y práctico entre la Biología y la Física.

Este trabajo de carácter exploratorio deja abiertas interrogantes para futuras investigaciones. Entre las proyecciones más destacadas, nos planteamos estudiar si el movimiento de las hormigas en condiciones de total libertad (sin las restricciones de las paredes del recinto) presentaría características brownianas. Asimismo, resulta fundamental indagar sistemáticamente cómo depende el tiempo de relajación (τ_r) del sistema en función de variables clave, como el número total de individuos (N) y la longitud de la abertura entre compartimentos (l). Además, resulta de gran interés explorar el comportamiento de las hormigas variando parámetros del medio (tales como la temperatura, la rugosidad de la superficie o la iluminación), lo que permitiría comprender mejor la influencia del entorno en su dinámica.

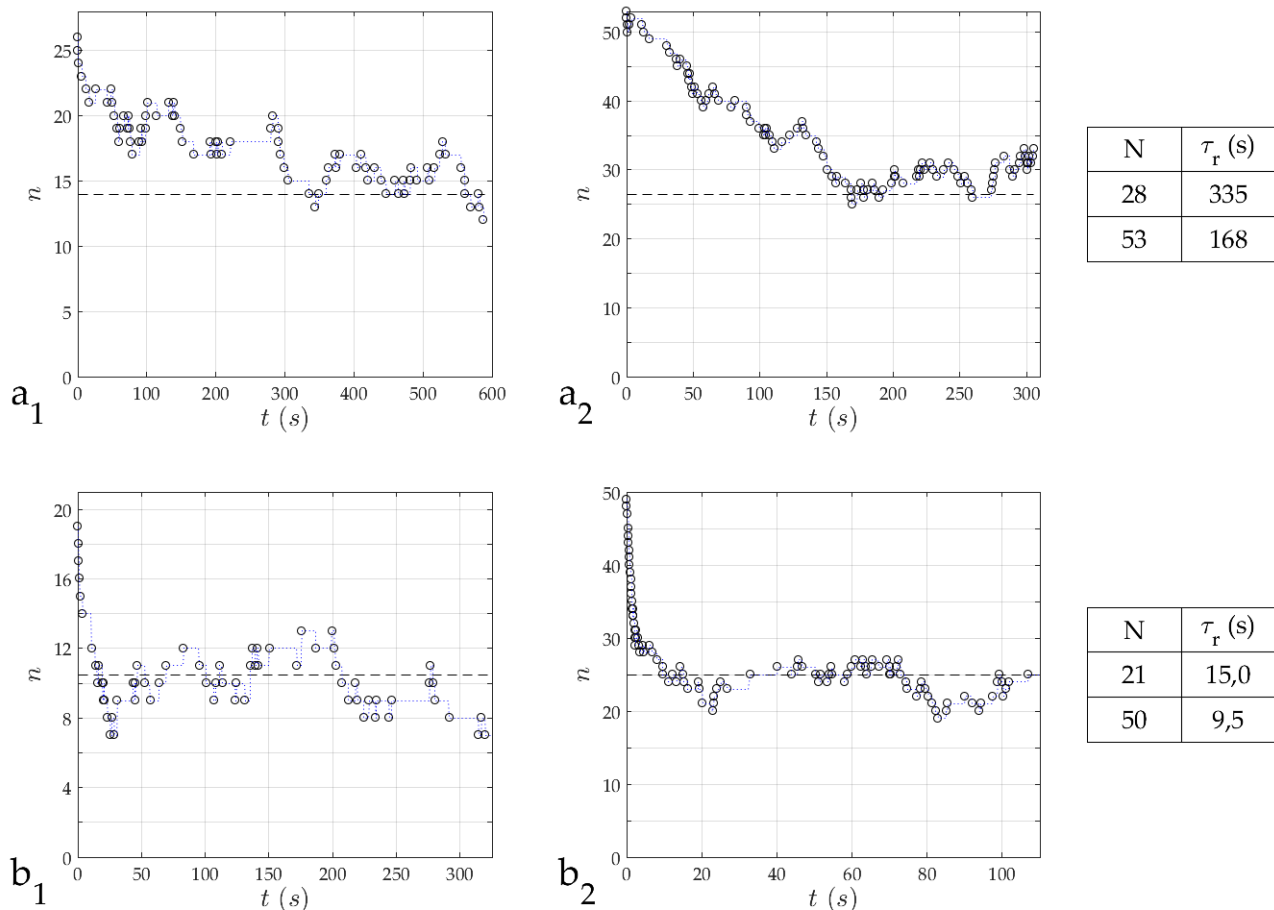


Figura 6. Número de hormigas, n , en un compartimento en función del tiempo para 4 realizaciones diferentes. Se observa que tras un tiempo de relajación, τ_r , el número de hormigas oscila en torno al equilibrio, en $n = \frac{1}{2}N$ (línea cortada). La fila a muestra la difusión al abrir en $t = 0$ s una ranura de $l = (5,0 \pm 0,3)$ cm entre ambos compartimentos con $N = 28$ (panel a_1) y $N = 53$ (panel a_2). La fila b muestra la difusión al eliminar completamente la barrera en $t = 0$ s con $N = 21$ (panel b_1) y $N = 50$ (panel b_2). Las tablas muestran el tiempo de relajación τ_r en función de N .

6. Referencias

- [1] M. C. Marchetti, et al., *Hydrodynamics of soft active matter*, Reviews of Modern Physics (2013).
- [2] W. Ebeling & F. Schweitzer, *Self-Organization, Active Brownian Dynamics, and Biological Applications*. arXiv preprint cond-mat/0211606. (2002).
- [3] P. Romanczuk, et al., *Active Brownian Particles. From Individual to Collective Stochastic Dynamics*, The European Physical Journal Special Topics, 202(1), 1-162. (2012).
- [4] S. Goss, et al., *Self-Organized Shortcuts in the Argentine Ant*, Naturwissenschaften 76(12), 579-581 (1989).
- [5] S. D. Ryan, *A Model for Collective Dynamics in Ant Raids*. Journal of mathematical biology, 72(6), 1579-1606. (2015).
- [6] A. Perna, et al., *Individual rules for trail pattern formation in Argentine ants (Linepithema humile)*. PLoS computational biology, 8(7), e1002592. (2012).
- [7] L. Edelstein-Keshet, et al., *Trail following in ants: individual properties determine population behaviour*. Behavioral Ecology and Sociobiology, 36(2), 119-133. (1995).
- [8] C. Detrain & J. Deneubourg, *Self-organized structures in a superorganism: do ants "behave" like molecules?*. Physics of life Reviews, 3(3), 162-187. (2006).
- [9] S. Thiawatwanikul, et al., *Modeling navigation by weaver ants in an unfamiliar, featureless environment*. Physical Review E, 101(5), 052404. (2020).
- [10] L. Charoonratana, et al. *Modeling the movement of Oecophylla smaragdina on short-length scales in an*

- unfamiliar environment. *Movement Ecology*, 11(1), 64. (2023).
- [11] V. Dodoková, et al., *A stochastic model of ant trail formation and maintenance in static and dynamic environments*. *Swarm Intelligence*, 18(4), 335-371. (2024).
- [12] M. Vela-Pérez, et al., *From individual to collective dynamics in argentine ants (Linepithema humile)*. *Mathematical biosciences*, 262, 56-64. (2015).
- [13] R. P. Feynman, R. B. Leighton, y M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Vol. 1 Addison-Wesley, Reading, MA. (1963).
- [14] A. Einstein, "Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen", *Annalen der Physik*, 322, 549-560. (1905).
- [15] F. Reif. *Física estadística* (Berkeley Physics Course). Reverte. ISBN 8429140255. (1993)
- [16] F. B. Baccaro, et al., *Guia para os gêneros de formigas do Brasil*. Editora INPA, Manaus. (2015).
- [17] Brown, D., Hanson, R., & Christian, W. *Tracker Video Analysis and Modeling Tool* (Version 6.1.5) [Computer software]. Open Source Physics. (2024). <https://opensourcephysics.github.io/tracker-website/>
- [18] Metzler, R., Jeon, J. H., Cherstvy, A. G., & Barkai, E. *Anomalous diffusion models and their properties: non-stationarity, non-ergodicity, and ageing at the centenary of single particle tracking*. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 16(44), 24128-24164. (2014).
- [19] J. F. Traniello, et al., *Search behavior and foraging ecology of the ant Formica schaufussi: colony-level and individual patterns*. *Ethology Ecology & Evolution*, 3(1), 35-47. (1991).

7. Anexo

A continuación se anexa el algoritmo utilizado para analizar datos en el software MATLAB. Se agregaron comentarios explicativos en verde y después del símbolo de porcentaje (%).

```
%Se limpia el entorno de trabajo antes de iniciar el análisis:
close all; clear; clc
%Se cargan los datos experimentales obtenidos de Tracker y se separan las columnas de tiempo y posición:
data = load('DATOSDETRACKER.txt');
t = data(:,1); x = data(:,2); y = data(:,3);
%Se definen las variables necesarias para calcular el MSD:
N = length(t); MSD = zeros(N-1, 1);
%Se calcula el desplazamiento cuadrático medio para distintos intervalos temporales con un bucle:
for tau = 1:N-1
    desplazamiento_cuadratico = 0;
    %Para cada tau, se comparan posiciones separadas por ese intervalo:
    for i = 1:(N - tau)
        dx = x(i + tau) - x(i);
        dy = y(i + tau) - y(i);
        desplazamiento_cuadratico = desplazamiento_cuadratico + dx^2 + dy^2;
    end
    %Se promedia el desplazamiento cuadrático sobre todos los pares disponibles:
    MSD(tau) = desplazamiento_cuadratico / (N - tau);
end
%Se grafica el MSD en función del tiempo de retardo:
figure; plot(t(1:N-1), MSD, 'b.', 'Markersize',6.5)
xlabel('$t \ (s)$','Interpreter','latex','FontSize',14)
ylabel('$MSD \ (m^2)$','Interpreter','latex','FontSize',14)
set(gca, 'FontName', 'DejaVu Math TeX Gyre', 'FontSize', 12)
xlim([0,120])
grid on
%Se construye un histograma bidimensional de ocupación espacial:
figure(); h2 = histogram2(x, y, 30,'FaceColor','flat');
set(gca, 'FontName', 'DejaVu Math TeX Gyre', 'FontSize', 12)
xlabel('$x \ (m)$', 'Interpreter','latex','FontSize',14)
ylabel('$y \ (m)$', 'Interpreter','latex','FontSize',14)
zlabel('$Fotogramas$', 'Interpreter','latex','FontSize',14)
%Se grafica la trayectoria completa de la hormiga en el plano:
figure(); plot(x, y, 'b')
xlabel('$x \ (m)$', 'Interpreter','latex','FontSize',14)
ylabel('$y \ (m)$', 'Interpreter','latex','FontSize',14)
set(gca, 'FontName', 'DejaVu Math TeX Gyre', 'FontSize', 12)
grid o
```



Gráficas de posición en función del tiempo para estudiantes no videntes: una propuesta didáctica inclusiva desde diagrama de puntos.



Simón Aparain¹

¹ Liceo N° 75 "Petrona Viera", Dirección General de Educación Secundaria, Montevideo, Uruguay.

E-mail: simonaparain@gmail.com

(Recibido el 9/4/2026, aceptado el 2/6/2026)

Resumen

La enseñanza de las gráficas de posición en función del tiempo presenta dificultades específicas en contextos de educación inclusiva, particularmente para estudiantes no videntes o con baja visión, debido al carácter visual de estas representaciones. El trabajo presenta la implementación de una secuencia didáctica basada en el uso de diagramas de puntos y materiales táctiles como instancia previa a la formalización gráfica. A partir del análisis del contexto educativo uruguayo y del relevamiento de antecedentes internacionales en educación en física inclusiva, se plantea una secuencia que articula experiencia sensorial, exploración táctil y construcción conceptual. Se sostiene que la traducción de representaciones visuales a formatos accesibles no solo favorece la inclusión, sino que también fortalece la comprensión conceptual del movimiento.

Palabras clave: educación, inclusión, física, gráficas, discapacidad visual.

Abstract

Teaching position-versus-time graphs presents specific difficulties in inclusive education contexts, particularly for blind or low-vision students, due to the visual nature of these representations. This paper presents a teaching sequence based on the use of dot diagrams and tactile materials as a preliminary stage to graphical formalization. Based on an analysis of the Uruguayan educational context and international precedents in inclusive physics education, a sequence is proposed that articulates sensory experience, tactile exploration, and conceptual construction. It is argued that translating visual representations into accessible formats not only promotes inclusion but also strengthens the conceptual understanding of motion.

Keywords: education, inclusion, physics, graphs, visual impairment.

1. Introducción

La enseñanza de la Física presenta desafíos particulares para estudiantes no videntes o con baja visión, especialmente en contextos como el uruguayo, donde persisten barreras estructurales, materiales y pedagógicas en relación con la educación inclusiva. Si bien se cuenta con el Centro de Recursos para alumnos ciegos y con baja visión (CeR), con sede en Montevideo, que cumple un rol relevante en la elaboración de materiales didácticos accesibles y en el asesoramiento al profesorado, estas iniciativas no logran resolver completamente las dificultades existentes. Una de las principales dificultades radica en el carácter fuertemente visual de la disciplina, que se apoya en gráficos, diagramas y representaciones espaciales que no siempre cuentan con adaptaciones accesibles.

Según Booth y Ainscow [1], las dificultades no deben entenderse como inherentes al estudiantado, sino como resultado de la interacción de este con entornos educativos que no han sido diseñados desde una perspectiva inclusiva, en tanto el aprendizaje se configura en la relación entre estudiantes y las barreras presentes en los contextos educativos. Desde esta perspectiva, dichas barreras se manifiestan en limitaciones en el acceso a materiales, en la formación docente y en el uso de tecnologías accesibles, lo que impacta de manera directa en las trayectorias educativas.

El presente trabajo se propone abordar específicamente la enseñanza de las gráficas de posición en función del tiempo, a partir del diseño de una propuesta didáctica que prioriza la accesibilidad y la construcción conceptual mediante representaciones táctiles y sensoriales en una institución pública de Educación Media de Montevideo. Esta institución, se distingue por un compromiso firme con la inclusión de la población estudiantil con distintos requerimientos sensoriales y de apoyo, destacando la presencia de estudiantes no videntes o con baja visión. Esta realidad transforma la accesibilidad en una condición esencial y preexistente de todo el quehacer docente, garantizando que el entorno se adapte al estudiantado.

En este contexto, el artículo tiene como propósito sistematizar y compartir una experiencia situada sobre la puesta en práctica de esta secuencia, promoviendo la reflexión sobre los procesos de aula y sus alcances pedagógicos. Al compartir esta práctica situada en un 3° año Plan 2013, se busca identificar aquellos elementos positivos que permitieron potenciar la diversidad del aula como un motor de aprendizaje, aportando herramientas al colectivo docente para el abordaje de contenidos desde una perspectiva de derechos.

2. Marco teórico: inclusión, accesibilidad y enseñanza de la Física

Desde una perspectiva de derechos, la educación inclusiva se fundamenta en el reconocimiento del acceso al conocimiento como un derecho humano [2], lo que implica no solo la presencia del estudiantado en el aula, sino también su participación efectiva en los procesos de enseñanza y aprendizaje. En este sentido, la accesibilidad debe entenderse como una condición pedagógica estructural y no como una adaptación posterior o excepcional. Este enfoque se vincula con la perspectiva de Ainscow, quien define la inclusión como un proceso de identificación y eliminación de barreras que limitan el aprendizaje y la participación de todo el alumnado [3]. Bajo este enfoque, el énfasis se traslada desde las limitaciones individuales hacia el análisis de los contextos y las decisiones pedagógicas que pueden generar exclusión.

En el contexto uruguayo, este enfoque se sustenta en la Ley General de Educación N.º 18.437 [4], que establece el derecho a la educación como un derecho humano fundamental y promueve la inclusión educativa como principio rector del sistema. Asimismo, la Administración Nacional de Educación Pública (ANEP), mediante la Resolución N.º 1144/025 [5], plantea la necesidad de profundizar acciones que contemplen e integren los marcos legales vigentes en relación con los derechos de las personas con discapacidad y la educación inclusiva, consolidando un enfoque que articula normativa, políticas educativas y prácticas pedagógicas.

En el campo de la didáctica de la Física, la comprensión de conceptos como el movimiento ha sido analizada en relación con el uso de distintas formas de representación (gráficas, algebraicas y verbales). En particular, Perales Palacios [6] señala que los gráficos constituyen herramientas centrales en la construcción de significados, aunque su interpretación no resulta transparente para los estudiantes. En este marco, la predominancia de lo visual en dichas representaciones puede constituir una barrera para estudiantes no videntes, especialmente cuando no se desarrollan mediaciones alternativas que habiliten otros modos de acceso al conocimiento.

En esta línea, Castro-Castillo y Tuay-Sigua sostienen que las principales dificultades en la enseñanza de la física para estudiantes con discapacidad visual no radican en la condición sensorial, sino en el carácter fuertemente visual de las representaciones utilizadas. Al respecto, afirman que en diferentes investigaciones se ha hecho evidente que parte de la organización de la experiencia sensible que permite la comprensión de fenómenos está relacionada con la

experiencia visual de los sujetos, por lo que se deben proponer nuevas formas que permitan brindar otras oportunidades de acceso a los contenidos disciplinares a esta comunidad. [7, p. 3]

El uso del tacto, el movimiento corporal y la manipulación de objetos permite construir significados que no dependen exclusivamente de la visión. Por esto señalan que los modelos táctiles y los diagramas de puntos han demostrado ser herramientas útiles para representar relaciones espaciales y temporales de forma accesible. Estas estrategias encuentran su fundamento en el Diseño Universal para el Aprendizaje (DUA), marco que propone ofrecer múltiples formas de representación, así como de acción y expresión para garantizar que la variabilidad de los estudiantes sea contemplada desde el diseño original de la propuesta didáctica [8].

Desde esta perspectiva, Gomes Dickman y Ferreira [9] advierten que la fuerte dependencia de representaciones visuales en la enseñanza de la física constituye una de las principales barreras de acceso al conocimiento. En consecuencia, subrayan la necesidad de integrar otros canales sensoriales, como el tacto y la audición, junto con una mediación docente planificada, destacando que la inclusión requiere una transformación en las concepciones pedagógicas que orientan la enseñanza.

De igual modo, Barbosa Lima et al. [10] plantean que la enseñanza de la física a personas con discapacidad visual debe superar un enfoque centrado en la acumulación de contenidos y en la visualidad, incorporando la imaginación, la experiencia sensorial y la mediación pedagógica como elementos centrales en la construcción de conceptos científicos.

En este punto, resulta clave recuperar el aporte de Anijovich [11], quien plantea que enseñar en aulas heterogéneas implica reconocer la diversidad como punto de partida y no como obstáculo, lo que exige diseñar propuestas didácticas flexibles, diversificadas y con múltiples modos de acceso al conocimiento. Desde esta perspectiva, la inclusión no se resuelve mediante adaptaciones aisladas, sino a través de decisiones pedagógicas que contemplen diferentes formas de aprender, participar y construir significado. Como sostiene Ainscow, la inclusión implica una búsqueda constante de formas de responder a la diversidad, convirtiéndola en una oportunidad para enriquecer el aprendizaje de todo el grupo [3].

3. Desafíos para la enseñanza de las representaciones gráficas de posición en función del tiempo.

Las gráficas de posición en función del tiempo constituyen una de las representaciones centrales en la enseñanza del movimiento. Esta representación permite interpretar conceptos como velocidad, desplazamiento y cambio de sentido del movimiento. Sin embargo, su enseñanza suele centrarse en la lectura visual de curvas en un plano cartesiano, lo que dificulta su acceso para estudiantes no videntes. La comprensión de la pendiente como razón de cambio, por ejemplo, depende habitualmente de la percepción de la inclinación de una recta, lo que requiere una mediación específica en contextos no visuales.

Camargo, Nardi y Viveiros, destacan que “La participación efectiva se da en la medida en que las actividades escolares, ofrecen plenas condiciones de actuación al alumno con deficiencia visual, explicitando sus verdaderas necesidades educativas”. [12, p. 8]. Lo que exige el diseño de estrategias didácticas que amplíen los canales de acceso al conocimiento más allá de la representación gráfica tradicional.

De acuerdo con McDermott et al. [13] se ha observado que incluso en estudiantes videntes existen dificultades en la interpretación de estas gráficas, como la confusión entre la forma de la curva y la trayectoria del movimiento. Esto refuerza la idea de que las representaciones gráficas no son transparentes, sino que requieren una enseñanza explícita. En este sentido, el desafío no radica únicamente en adaptar la gráfica, sino en repensar su enseñanza desde una lógica que priorice la construcción de significado antes que la formalización.

4. Propuesta didáctica: diagramas de puntos como mediación accesible

La propuesta didáctica se organiza en una secuencia que parte de la experiencia concreta del movimiento y avanza hacia la construcción de representaciones cada vez más abstractas. El eje central de esta secuencia es el uso de diagramas de puntos como instancia intermedia entre la experiencia y la gráfica cartesiana.

Un diagrama de puntos puede entenderse como una representación discreta del movimiento en la que se registran las posiciones sucesivas de un objeto en intervalos de tiempo iguales, organizadas de manera secuencial. Cada punto indica la posición del mismo en un instante determinado, lo que permite analizar la

regularidad o variación del movimiento a partir de la distancia entre ellos.

Conforme a Baccino et al. [14], la fotografía estroboscópica permite representar el movimiento mediante la superposición de imágenes tomadas en intervalos regulares, haciendo visibles las posiciones sucesivas de un objeto en una única representación y posibilitando el análisis de su evolución a partir de la separación entre dichas posiciones. A partir de este aporte, es posible establecer una analogía con los diagramas de puntos, en la medida en que cada imagen cumple una función equivalente a la de un punto, al indicar la posición del móvil en un instante determinado. En este sentido, el diagrama de puntos puede comprenderse como una mediación que conserva la estructura temporal del fenómeno a través de su discretización, a la vez que simplifica su representación, facilitando el pasaje hacia la construcción de la gráfica de posición en función del tiempo.

Del mismo modo, una vez elaborada la gráfica de posición-tiempo, es posible interpretar los puntos que la integran bajo la misma lógica del diagrama de puntos. Al recuperar este carácter discreto, se facilita la comprensión del movimiento, ya que permite analizar lo que sucede en cada instante observando simplemente la distribución y la distancia entre los puntos de la gráfica.

Siguiendo a Cuevas Ortigón [15], quien plantea la importancia de generar condiciones de participación equitativas en el aula, se procura que todo el estudiantado cuente con iguales posibilidades de comprender el concepto mediante una participación activa en el proceso de aprendizaje. De este modo, se favorece el desarrollo de dimensiones formativas que trascienden el pensamiento científico, promoviendo el reconocimiento y respeto por la diversidad a partir de la integración de estudiantes videntes y no videntes en una misma experiencia educativa.

Asimismo, la propuesta retoma el enfoque de la “física sensorial” desarrollado por Gonçalves [16], el cual demuestra que la incorporación de experiencias sensoriales directas favorece la comprensión de los fenómenos físicos y promueve la participación en aulas inclusivas, al habilitar otros canales perceptivos más allá de lo visual.

4.1. Etapa 1: experiencia corporal del movimiento

Se propone iniciar con actividades en las que el estudiantado experimente el movimiento en el espacio, por ejemplo, caminando a velocidad constante o variable en línea recta. Durante esta instancia, se

pueden utilizar referencias sonoras o indicaciones verbales para marcar intervalos de tiempo.

El objetivo es que el estudiantado construya una primera noción de la relación entre tiempo y posición a partir de su propia experiencia corporal.

4.2. Etapa 2: registro mediante diagramas de puntos

A partir de la experiencia, se introduce el diagrama de puntos como forma de representación. En lugar de una curva continua, se registran posiciones en intervalos de tiempo discretos mediante puntos.

Estos diagramas pueden construirse utilizando materiales táctiles, como:

- Tableros con relieve
- Cascola con relieve
- Chinchas o clavijas
- Hilos o bandas elásticas
- Papel microcapsulado o impresiones en relieve

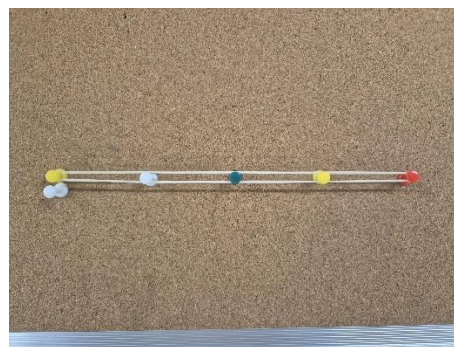


Figura 1. Diagrama de puntos representado con chinchas. Imagen de autoría

Cada punto representa la posición del móvil en un instante determinado. En este caso, como se observa en la Figura 1, se utilizan chinchas para representar los puntos. La separación entre los puntos permite inferir características de la velocidad: puntos equidistantes indican velocidad constante, mientras que separaciones crecientes o decrecientes indican aceleración.

Esta representación presenta varias ventajas:

- Es accesible al tacto
- Permite una exploración secuencial (punto a punto)
- Facilita la comprensión de la relación entre variables sin requerir una curva continua.

En esta instancia, el énfasis se sitúa en la percepción táctil de la distribución espacial de los puntos, más que en la obtención de valores numéricos de posición. Para estudiantes no videntes, la comprensión de la relación funcional entre tiempo y posición emana de la exploración de la separación entre las chinchas: puntos

equidistantes informan sobre una regularidad en el movimiento, mientras que variaciones en la densidad táctil permiten inferir cambios de velocidad. Si bien el docente puede facilitar la medida oralmente para la posterior construcción de la gráfica, el núcleo del aprendizaje radica en la traducción de la experiencia sensorial a una estructura espacial accesible al tacto.

4.3. Etapa 3: interpretación y construcción de significado.

En esta etapa, se promueve la interpretación de los diagramas de puntos mediante preguntas orientadoras:

- ¿Dónde se encuentra el móvil en cada instante?
- ¿Cómo varía la distancia entre los puntos?
- ¿Qué indica esa variación sobre el movimiento?

El trabajo puede realizarse en pequeños grupos, favoreciendo la discusión y la construcción colectiva de significado.

4.4. Etapa 4: transición hacia la gráfica cartesiana

Una vez consolidada la comprensión de la relación entre tiempo y posición a partir de los diagramas de puntos, se introduce la gráfica cartesiana como una forma de representación más abstracta.

En el caso de estudiantes no videntes, esta transición puede realizarse mediante gráficos táctiles, donde los ejes y las curvas estén representados en relieve. Sin embargo, el énfasis no debe ponerse en la forma visual de la curva, sino en las relaciones que esta expresa, previamente construidas a partir del diagrama de puntos.



Figura 2. Gráfica de posición en función del tiempo accesible. Imagen de autoría

5. Conclusiones

A partir de la implementación de esta secuencia en el aula, se pueden extraer valoraciones basadas en la observación directa de la práctica docente. En primer lugar, la experiencia sugiere que el uso de diagramas de puntos como mediación táctil podría reducir la dependencia de la visión para la comprensión de conceptos cinemáticos, operando no como una simplificación, sino como una herramienta conceptual sólida.

La fundamentación para colectivizar esta propuesta radica en evidencias cualitativas detectadas durante la vivencia: se observó una participación más equitativa en los equipos de trabajo, donde el estudiantado vidente y no vidente logró discutir sobre el movimiento utilizando un mismo código de representación. Esta integración de lenguajes constituye uno de los elementos positivos que convirtieron a la secuencia en una experiencia valorada por el grupo.

No obstante, la práctica también permitió identificar debilidades que deben ser consideradas para futuras aplicaciones; por ejemplo, se notó que la precisión de los diagramas con chinchas podría verse limitada ante movimientos con variaciones de velocidad muy sutiles, lo que indicaría la necesidad de seguir mejorando los materiales táctiles.

Si bien la enseñanza de la Física ha priorizado recursos visuales para facilitar la comprensión, esta tendencia actúa como una barrera para estudiantes con discapacidad sensorial. Por lo tanto, esta experiencia personal me permitió observar que el diseño de propuestas flexibles y multisensoriales es una vía necesaria para avanzar hacia prácticas más inclusivas y justas en el marco de los Derechos Humanos.

A modo de consideraciones personales, esta experiencia sugiere el valor de seguir explorando el uso de diagramas de puntos en otros contenidos de la cinemática. Asimismo, el desarrollo de recursos táctiles abre una línea de trabajo docente que merece ser profundizada, ya que estas mediaciones podrían favorecer trayectorias de aprendizaje más accesibles y progresivas. En definitiva, se trata de continuar construyendo herramientas que permitan una comprensión conceptualmente sólida del movimiento desde una perspectiva inclusiva.

6. Referencias

- [1] T. Booth y M. Ainscow, *Guía para la Educación Inclusiva*, 3era ed. (FuHem, Madrid, 2015).

- [2] Organización de las Naciones Unidas (UNESCO), Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad, Naciones Unidas, <https://www.un.org/disabilities/documents/convention/convoptprot-s.pdf> (2006).
- [3] M. Ainscow, Haciendo que las escuelas sean más inclusivas: lecciones a partir del análisis de la investigación internacional. *Revista de Educación Inclusiva*, 5(1), 39-49. (2012).
- [4] Centro de Información Oficial (IMPO), Ley N.º 18.437: Ley General de Educación, <https://www.impo.com.uy/bases/leyes/18437-2008> (2008).
- [5] Administración Nacional de Educación Pública (ANEP), Resolución N.º 1144/025 sobre derechos de las personas con discapacidad y educación inclusiva, <https://www.anep.edu.uy/sites/default/files/imagenes/2025/resoluciones/202501/AAA0250121144.pdf> (2025).
- [6] F. J. Perales Palacios, Uso (y abuso) de la imagen en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 24(1), 13-30. (2006).
- [7] D. Castro-Castillo & R. Tuay-Sigua, Revisión sobre la enseñanza de la física en estudiantes con diversidad funcional visual, *Revista Científica* 46(1), 1-16 (2023).
- [8] C. Alba Pastor, *Enseñar pensando en todos los estudiantes. El modelo de Diseño Universal para el Aprendizaje (DUA)* (Ediciones SM, Madrid, 2022).
- [9] A. Gomes Dickman & A. C. Ferreira, Ensino e aprendizagem de Física a estudantes com deficiência visual: Desafios e perspectivas, *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências* 8(2) (2008).
- [10] M. da C. Barbosa Lima, F. A. de Oliveira Cruz, A. Ferreira Bêta Monteiro & P. S. de Oliveira Ferreira de Carvalho, "La imaginación es más importante que el conocimiento": Reflexiones sobre enseñanza de la física a personas con deficiencia visual, *Paradigma* 40(1), 231-245 (2019).
- [11] R. Anijovich, *Gestionar una escuela con aulas heterogéneas: Enseñar y aprender en la diversidad* (Paidós, Buenos Aires, 2014).
- [12] E. P. de Camargo, R. Nardi & E. R. de Viveiros, Análisis del proceso inclusivo del alumno ciego en clases de Física Moderna, *Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias* 7(1), 6-31 (2012).
- [13] L. C. McDermott, M. L. Rosenquist y E. H. van Zee, Student difficulties in connecting graphs and physics: Examples from kinematics, *Am. J. Phys.* 55, 503-513 (1987).
- [14] D. Baccino, Á. Suárez, A. Martí, Volviendo a las raíces: cómo crear fotos estroboscópicas a partir de vídeos digitales. *Revista de Enseñanza de la Física*, 30(2):45-53. (2018).
- [15] E. J. Cuevas Ortégón, ¿Cómo aprenden física los invidentes?, *Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias* 8(1) (2013).
- [16] C. J. G. Gonçalves, Física sensorial: uma proposta para o ensino de termologia a videntes e deficientes visuais (dissertação de mestrado), *Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas* (2019).