

# Estudio del movimiento de caída libre usando vídeos de experimentos

Francisco Vera<sup>1,a</sup>, Rodrigo Rivera<sup>1,b</sup>, Raúl Fuentes<sup>2,c</sup>, Diego Romero Maltrana<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Física. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Chile.

<sup>2</sup>Departamento de Industrias, Economía y Negocios. Universidad Técnica Federico Santa María. Chile.

<sup>a</sup>[fvera@ucv.cl](mailto:fvera@ucv.cl), <sup>b</sup>[rodrigo.rivera@ucv.cl](mailto:rodrigo.rivera@ucv.cl), <sup>c</sup>[raul.fuentes@usm.cl](mailto:raul.fuentes@usm.cl), <sup>d</sup>[diego.romero@ucv.cl](mailto:diego.romero@ucv.cl)

[Recibido en noviembre de 2014, aceptado en mayo de 2015]

Los trabajos pioneros de Eadweard Muybridge en fotografía e imágenes en movimiento en el año 1878 que dieron origen al vídeo, así como los de Harold Edgerton en vídeos de alta velocidad realizado a mediados del siglo XX, buscaban entender el comportamiento de la naturaleza. Hoy en día el uso de vídeo continúa siendo una herramienta muy valiosa en todas las disciplinas científicas. En la actualidad, el uso de vídeo está siendo incorporado en innovadoras formas de enseñar física que están tomando fuerza a nivel mundial. En concordancia con esta tendencia, y motivados por potenciar dos elementos fundamentales dentro del aprendizaje de las ciencias, como son su proceso de carácter reflexivo y su vínculo profundo con la experiencia práctica, hemos generado una galería de vídeos de experimentos para mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje en alumnos de enseñanza secundaria y universitaria en las materias de Mecánica Newtoniana. En este trabajo presentamos una secuencia de experimentos relacionados con el fenómeno de caída libre, a fin de mostrar el potencial que tiene el uso de experimentos en vídeo para mejorar la comprensión conceptual en cursos de física básica.

**Palabras clave:** TIC. E-learning. Vídeo. Física. Experimentos. Movimiento. Caída libre.

## Study of the free fall motion using experiments in video

The pioneering work of Eadweard Muybridge in photography and motion pictures in 1878 that gave rise to video technology, as well as those of Harold Edgerton in high-speed videos made in the mid-twentieth century, sought to understand the behaviour of nature and nowadays remain as valuable tools in all scientific disciplines. At present, the use of video is being incorporated into innovative ways of teaching physics that are gaining a worldwide momentum. In line with this trend, and motivated to enhance two key elements in the learning of science, such as the reflexive nature of the learning process and its deep connection with practical experience, we have created a gallery of videos of experiments to improve the teaching and learning experience in high school and university education in the fields of Newtonian Mechanics. Here, we present a sequence of experiments related to the phenomenon of free fall, in order to demonstrate the potential of using experiments in video to improve the conceptual understanding in elementary physics courses.

**Keywords:** ICT. E-learning. Video. Physics. Experiments. Motion. Free fall.

## Introducción

El análisis sistemático del movimiento de los objetos permitió a Galileo Galilei producir un cambio profundo en nuestra concepción del mundo, formando la base de lo que se conoce como el Método Científico (Einstein 1934, Russo 2004, Vera *et al.* 2011). Lucio Russo (2004) rastreó los orígenes del método científico moderno hasta los científicos del período helenístico. Él cita, por ejemplo, una frase reveladora de Filón de Bizancio: «Que no todo se puede lograr a través del pensamiento puro y los métodos de la mecánica, sino que mucho se puede encontrar por medio de la experimentación...».

Galileo no podría haber dimensionado jamás la profundidad conceptual de sus prácticas metodológicas, pues en ese tiempo se desconocía cómo la materia interactúa a través de las fuerzas, que gracias a las contribuciones de Newton, se asocian a cambios de velocidades de los cuerpos involucrados. Es decir, si un cuerpo físico interactúa con otro, este proceso implica necesariamente que su movimiento cambiará, lo cual nos permite estudiar la

trayectoria del cuerpo; si no interactúa no hay forma de acceder a dicha trayectoria, de forma análoga a como nosotros no somos capaces de percibir el continuo bombardeo de neutrinos que atraviesan nuestro cuerpo cada segundo, y de quienes seguiríamos perfectamente ignorantes si no se hubiesen creado detectores lo suficientemente sensibles para medir su pequeña interacción. De ahí que el estudio sistemático de posiciones y tiempos, inherente al movimiento y sus cambios, es la forma más directa de acceder a conocer el comportamiento de la naturaleza. Fue así entonces como Galileo revolucionó el conocimiento humano.

A través de la experimentación, Galileo demostró que Aristóteles estaba equivocado, y que el movimiento de un cuerpo en caída libre es independiente de su masa. Galileo se dio cuenta de ello notando que la disminución de la fuerza de fricción permite un análisis correcto del movimiento simple de un objeto que cae hacia la superficie de la Tierra. Al usar objetos que ruedan por planos inclinados, fue capaz de estudiar movimientos que cambian con la suficiente lentitud para poder concluir que ellos aceleraban de manera constante y que, contrario a la intuición, su aceleración era independiente de la masa del objeto. El análisis de un experimento de caída libre es incluso hoy una tarea difícil sin el uso de sensores modernos, el uso de la tecnología de vídeo iniciado por Eadweard Muybridge (o Edward James Muggeridge) quien en 1878 logró demostrar científicamente que un caballo al correr levanta sus cuatro patas (Muybridge 1878, Wikipedia 2014b), o el uso de vídeos de alta velocidad en la línea de los trabajos iniciados por Edgerton a mediados del siglo XX (Wikipedia 2014a).

El objetivo principal de este trabajo es mostrar al lector que el uso de vídeos de experimentos en conjunto con guías basadas en la metodología indagatoria, es una poderosa herramienta para enseñar física en las escuelas y universidades.

## Metodologías de aprendizaje basadas en la indagación

«Aprendizaje» no es reducible a «almacenamiento de datos»; corresponde más bien a un proceso, a un entramado complejo en donde quien aprende incorpora de manera activa experiencias, conceptos y sus relaciones hasta cohesionarlos en un todo coherente, y es un proceso eminentemente individual. Es el individuo quien aprende, por ende es él quien ha de hacer el ejercicio racional de componer sus experiencias y los conceptos que se le ofrecen para llegar, finalmente, a aprender. Nuestro rol como educadores consiste entonces en generar el ambiente adecuado, y en proveer de los elementos necesarios para promover dicho proceso, pero el éxito de la empresa dependerá, en definitiva, de cuán activo sea el estudiante a lo largo de su propio aprendizaje.

Como es sabido, estas ideas se encuentran enraizadas en toda vertiente constructivista (Coll 1996, Pozo 1996, Izquierdo 2000, Perales y Cañal de León 2000) y es enfatizada, particularmente, por las metodologías de enseñanza basadas en la indagación (Thacker *et al.* 1991, NRC 2000, Minner *et al.* 2010). En este marco, el profesor toma el rol de guía a través de la solución a alguna problemática a la que el estudiante ha sido previamente expuesto, y este último es invitado a generar sus propias hipótesis, a discutir las y probarlas, a analizar los errores que pueda haber tenido su razonamiento, asentando así los contenidos de forma más sólida de lo que podría llegar a hacerlo asistiendo a la sola exposición de hechos.

Las metodologías de enseñanza basadas en la indagación se han ido incorporando al currículo debido a su probada eficacia como vehículo en la asimilación de conceptos (AAAS 1990, NRC 1996), particularmente en la enseñanza de la física (McDermott 1991, McDermott y Redish 1999, Minner *et al.* 2010, Harlen 2010). La Enseñanza Basada en la Indagación es un campo maduro en la educación en física y puede ser fácilmente complementada incorporando,

por ejemplo, experimentos reales, simulaciones computacionales, vídeos de experimentos, resolución de problemas contextualizados, etcétera.

En las últimas décadas se ha trabajado intensamente en el desarrollo de innovadoras herramientas didácticas basadas en distintas estrategias metodológicas y desde diferentes enfoques (McDermott y Shaffer 1992, Shaffer y McDermott 1992, Hennessy *et al.* 2007). Pese al valor intrínseco de cada una de ellas, se ha demostrado que el uso de nuevos recursos por sí solo no garantiza mejoras en el aprendizaje, pudiendo incluso reforzar errores conceptuales, si éstos no están acompañados de criterios pedagógicos que guíen su utilización (AAAS 1990, Redish 2003, Romero y Quesada 2014).

En nuestro caso, hemos creado guías en el marco de las metodologías de enseñanza basadas en la indagación que incorporan vídeos de experimentos en una secuencia lógica definida a partir de resultados de investigación y que promueven que los estudiantes hagan predicciones, discutan entre ellos y con sus profesores, y que comprueben sus predicciones con los resultados de experimentos reales grabados en los vídeos correspondientes. Los estudiantes pueden aprender así «haciendo ciencia a pequeña escala» de una manera rápida y, además, económica, entendiendo por tal que, en promedio, la elaboración de un vídeo tiene un valor aproximado de 15 euros.

Pese a que el resultado es un producto integral, que incorpora tanto el uso de vídeos como de guías generadas bajo los criterios pedagógicos antes expuestos, este trabajo se focaliza principalmente en exponer algunas de las ventajas del uso de experimentos en vídeo, destacando su flexibilidad con el criterio pedagógico que el profesor emplee, lo que significa, in praxis, que educadores con distintas preferencias pedagógicas puedan también hacer uso de este material.

La Galería del proyecto Galileo (<http://www.GaleriaGalileo.cl/>) está compuesta por un conjunto de experimentos simples diseñados para ser usados como parte de una secuencia dentro del proceso de enseñanza-aprendizaje al enseñar física en escuelas y universidades. Cada uno de ellos rescata fenómenos físicos claves y ricos en términos conceptuales, por lo que pueden servir como herramienta dentro de una amplia gama de secuencias de enseñanza-aprendizaje.

A manera de ejemplo de como usar estos vídeos en el aula, nuestras guías pueden ser visualizadas al hacer clic en el botón pdf que se encuentra al inicio de la sección que muestra el listado de vídeos asociados a cada tema de la galería. Estas guías están diseñadas para ser proyectadas en un aula normal en donde los experimentos en vídeo se discuten en base a preguntas formuladas a los alumnos.

## Uso de vídeo en la enseñanza de la física

La enseñanza de la física puede mejorar en gran medida con el uso de metodologías modernas de aprendizaje. En este contexto, el uso del vídeo (Live Photo 2014, Laws 2009) puede proporcionar la base para un nuevo estilo de clases que permita a los alumnos aprender física de manera contextualizada, donde los conceptos que se quiere enseñar estén asociados a experimentos simples.

En nuestra opinión, creemos que no existe una metodología de enseñanza-aprendizaje, en el contexto de la física, que sea mejor que aquella ligada a la experimentación; no solo debido al indudable éxito que ha tenido —y sigue teniendo— la experimentación en la construcción del conocimiento humano desde los revolucionarios aportes de Galileo, sino también desde una perspectiva pedagógica orientada a construir puentes entre las construcciones teóricas-abstractas y el plano tangible y vivencial. ¿Qué ruta puede ser más directa hacia el cerebro del

estudiante que aquello que ve por sí mismo, sobre todo cuando los conceptos asociados alcanzan niveles de abstracción tales que el mensaje transmitido dentro de una clase expositiva carece de sentido para él?

Así como Galileo aprendió de los experimentos, el uso de vídeos de experimentos permite implementar una metodología simple y económica para emular y estimular el pensamiento científico. Debido a que en términos experienciales o vivenciales la mayoría de los experimentos científicos son sucesos o eventos en donde los resultados se pueden observar, el vídeo reproduce en alto grado aquello que es relevante de lo que percibiría el estudiante si, en vez de mirar una pantalla, realizara por sí mismo el experimento, permitiendo centrar la atención del sujeto en el contenido de la experiencia y no en los detalles operacionales que la hacen funcionar.

Reconocemos que dichas habilidades experimentales son importantes, sobre todo en la formación de futuros científicos. Diseñar un experimento exitoso puede llegar a ser, a veces, un verdadero arte. Lograr identificar los pormenores que interfieren en el diseño y correcto desempeño de los experimentos requiere de un entrenamiento laborioso, y si bien es cierto que el manejo de esos detalles evidencia una alta comprensión de los fundamentos teóricos subyacentes, no es menester dominar técnicas experimentales sofisticadas para acceder a los conceptos que el experimento ilustra.

Por este motivo, hemos escogido los vídeos como herramientas didácticas (Morales *et al.* 2012), recogiendo con ello lo mejor de dos mundos. Por un lado, generamos una instancia en la que el estudiante observa por sí mismo un fenómeno que lo enfrenta, usualmente, con sus concepciones previas con el fin de promover, a través de sus propias apreciaciones, el análisis crítico que lo conducirá a los conceptos que el educador pretende enseñar. Por otro lado, removemos los problemas técnicos asociados al desarrollo de las experiencias y a la medición precisa, la que en este caso queda reducida a un clic en una pantalla, guiando así a nuestros estudiantes hacia una comprensión profunda de conceptos físicos en conexión con experimentos reales, fuente de toda validez y sustento de las ciencias naturales.

## Obtención de coordenadas a partir de un vídeo

La obtención de coordenadas de posición a partir de un vídeo es una herramienta sencilla y potente que permite medir el tiempo y la posición de los objetos en movimiento en una o dos dimensiones (Laws 2009, Morales *et al.* 2012, Vera y Romanque 2009). Hoy en día es posible adquirir cámaras de vídeo de alta velocidad que permiten explorar una amplia gama de experimentos que son muy difíciles de medir haciendo uso de otro tipo de sensores. Vernier Logger Pro (Vernier 2014) –software comercial– es una de las herramientas más utilizadas por los profesores de física actualmente junto al software de código abierto Tracker (Tracker 2014). Vernier vende también el software Video Physics para iPad y iPhone.

Los vídeos del sitio web [www.GaleriaGalileo.cl](http://www.GaleriaGalileo.cl) son fáciles de usar y descargar, son de libre acceso, y pueden ser utilizados directamente para obtener coordenadas de posición y tiempo haciendo clic en las imágenes. El software que permite obtener coordenadas es de libre acceso y no necesita de un proceso de instalación, pues está incorporado en las páginas web en donde se muestran los vídeos. Con ello esperamos dar un paso más en la dirección de la democratización del conocimiento y el fomento a la educación de calidad para todos, reconocido como un derecho y no como un producto de mercado.

Después de completar el proceso de obtención manual de coordenadas, los datos obtenidos se pueden copiar y pegar dentro de una planilla de cálculo para hacer gráficos y proceder a la etapa de análisis.

En resumen, se le entrega al estudiante un vídeo en el que puede observar un fenómeno tal y como lo vería en un laboratorio, y junto a ello se le dan herramientas sencillas para hacer mediciones precisas que, en el laboratorio, serían difíciles de realizar. A partir de ellas podrá llevar a cabo el análisis que le conducirá, como a cualquier científico, a la identificación de relaciones entre las variables en juego, aprendiendo de la experiencia y de sus propias reflexiones.

A continuación se presentarán, a modo de ejemplo, seis experimentos sencillos y ricos en conceptos empleados en la enseñanza de Mecánica Newtoniana en el tópico particular de la caída de los cuerpos. El primero de ellos tiene el propósito de demostrar que dos objetos de masas muy diferentes caen lado a lado si se liberan al mismo tiempo y si no se ejerce sobre ellos ninguna fuerza más que la de la gravedad (Galería de Galileo 2014a).

### Caída libre de un zapato y una moneda

En el experimento mostrado en la figura 1, el zapato tiene una masa de alrededor de 300 veces la masa de la moneda, lo que produce una gran diferencia entre las fuerzas gravitatorias que ejerce la Tierra sobre cada uno de ellos. Sin embargo, de acuerdo con Galileo, en ausencia de fricción estos objetos deberían caer uno al lado del otro. El vídeo fue grabado a 240 cuadros por segundo (fps, por su sigla en inglés), lo que permite la visualización del experimento en cámara lenta. Se puede apreciar en el vídeo que los objetos fueron lanzados simultáneamente con un error menor a  $1/240$  de segundo, y que estos llegan al suelo simultáneamente dentro de la misma precisión.

En nuestras tareas docentes, hemos constatado que los estudiantes, pese a que muchos de ellos están al tanto de la famosa historia de Galileo y la torre inclinada de Pisa, quedan en general perplejos al ver este vídeo, cuando se observa que ambos objetos llegan al suelo al mismo tiempo.

El vídeo muestra que la fuerza de fricción en este «experimento de caída casi libre» juega solo un papel secundario y puede ser ignorada. En contraste, para eliminar los efectos de la fuerza de roce con el aire en la caída de objetos como una pluma o un pedazo de papel es necesario contar con dispositivos más complejos y de alto costo, tales como cámaras y bombas de vacío. En efecto, en el experimento de caída libre de una pluma y una esfera metálica dentro de un tubo transparente después de que se ha hecho vacío, la pluma cae con una aceleración  $g$  al igual que la esfera. El profesor puede también mostrar a los estudiantes el vídeo del *Apolo 15*, en donde el astronauta David Scott deja caer un martillo y una pluma hacia la superficie de la Luna (Galería de Galileo 2014b).



**Figura 1.** Un zapato y una moneda en caída libre.

El equilibrio perfecto entre la masa inercial y la masa gravitacional explica por qué objetos de diferente masa caen juntos en caída libre. Sin embargo, algunos estudiantes que no entienden el rol que juegan estos conceptos al aplicar la segunda ley de Newton tienden a pensar que cualquier objeto, independiente de si sobre él actúan o no otras fuerzas, caerá siempre con una aceleración igual a  $g$ .

A continuación discutiremos algunos vídeos de experimentos que fueron diseñados para mostrar que no todos los objetos que caen en presencia de la gravedad terrestre lo hacen con una aceleración igual a  $g$ . Además, mostraremos cómo el análisis de experimentos en vídeo

puede ser una herramienta útil en investigación. Para ello discutiremos un experimento simple que es enseñado habitualmente en un primer curso de Mecánica Newtoniana, en donde el uso de vídeo nos ha permitido demostrar que la explicación aceptada contiene un grave error conceptual.

## Fricción y caída libre

El rol que juega la fricción en el movimiento de un cuerpo que cae se puede introducir a los alumnos usando el ejemplo de un paracaídas, en donde el roce afecta el movimiento de tal manera que el objeto alcanza una velocidad terminal constante en lugar de aumentar su velocidad a una tasa de  $g=9,8 \text{ m/s}^2$ .

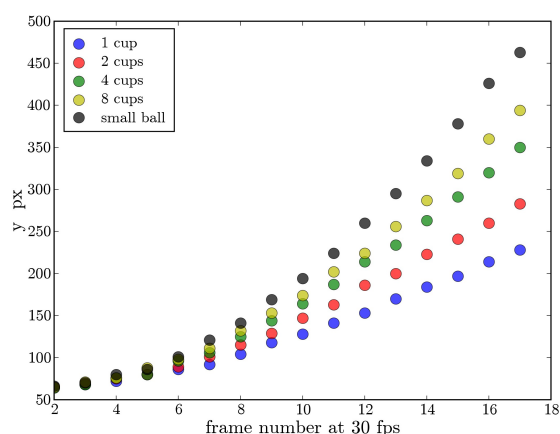
El experimento que es típicamente usado en laboratorios de docencia para mostrar los efectos de la fricción en la caída de objetos consiste en varias esferas de diferentes radios que se dejan caer en un fluido viscoso para medir sus velocidades terminales constantes (Young 2001, Gluck 2003, Calderón *et al.* 2007). Una versión más simple de este experimento consiste en dejar caer moldes de papel para magdalenas apilados a fin de variar sus masas manteniendo su superficie de contacto con

el aire, y en donde se utiliza vídeo para obtener coordenadas de posición y de tiempo (Galería de Galileo 2014c). La figura 2 muestra la configuración utilizada por nosotros para lanzar al mismo tiempo una pelota y varios conjuntos de moldes de papel apilados.



**Figura 2.** Configuración para soltar en forma simultánea los moldes de papel de papel apilados.

La figura 3 muestra las coordenadas en función del tiempo correspondiente a 1, 2, 4 y 8 moldes de papel apilados que se dejaron caer simultáneamente junto a una pequeña esfera. Debido a que el efecto de la fricción en el movimiento de cada objeto es pequeño a bajas velocidades, todos los gráficos coinciden para tiempos pequeños al inicio del experimento. La curva correspondiente a la esfera sigue una trayectoria parabólica, pero los conjuntos de moldes de papel se apartan de esta tendencia como consecuencia de la fuerza de fricción con el aire, terminando como líneas rectas cuyas pendientes corresponden a la velocidad terminal de cada conjunto.



**Figura 3.** Gráfico de posición ( $y$ ) versus tiempo ( $t$ ) obtenido para los diferentes conjuntos de moldes de papel apilados que se dejaron caer simultáneamente con una pequeña esfera.

## Un error de más de 100 años

Explicaremos a continuación el diseño de un experimento sencillo que permite mostrar de una manera muy simple un error común en la explicación del experimento clásico en el que un pequeño trozo de papel se coloca sobre un libro (o sobre una moneda) y el sistema se deja caer (Galería de Galileo 2014d, Galería de Galileo 2014e, PoS-Ireland 2003, Vera y Rivera

2011). Esta demostración se ha utilizado por más de 100 años en los cursos de introducción a la física para demostrar que el libro elimina la fuerza de fricción del aire sobre la hoja de papel y el papel cae con una aceleración igual a  $g$  (Estatella 2008).

Nuestro diseño del experimento nos permite probar si el papel se mueve junto al libro debido a que una fuerza de fricción insignificante permite al papel efectuar un movimiento de caída libre, o si el papel es «arrastrado» por el libro debido a una fuerza de succión producida por una disminución de la presión del aire detrás del libro. En esta nueva versión del experimento una esfera y un trozo de papel se colocan sobre un libro, el cual es forzado a caer con una aceleración mayor a  $g$  mediante el uso de cuerdas elásticas.

El experimento mostrado en la figura 4 fue grabado utilizando una cámara de vídeo de alta velocidad a 300 fps (Galería de Galileo 2014d). La imagen de la figura fue seleccionada debido a que muestra el pedazo de papel cayendo detrás del libro, mientras que la esfera –que se dejó caer justo encima de la hoja de papel– ha recorrido una menor distancia, cayendo en caída libre. El vídeo en cámara lenta muestra que el libro cae más rápido que una caída libre, arrastrando al pedazo de papel en un movimiento con una aceleración también mayor a  $g$ , permitiendo concluir que, en el experimento típico de la caída del libro y el papel mostrado a los alumnos, no es posible determinar que el papel cae en caída libre.



Figura 4. Nuestra versión del experimento del libro y el papel.

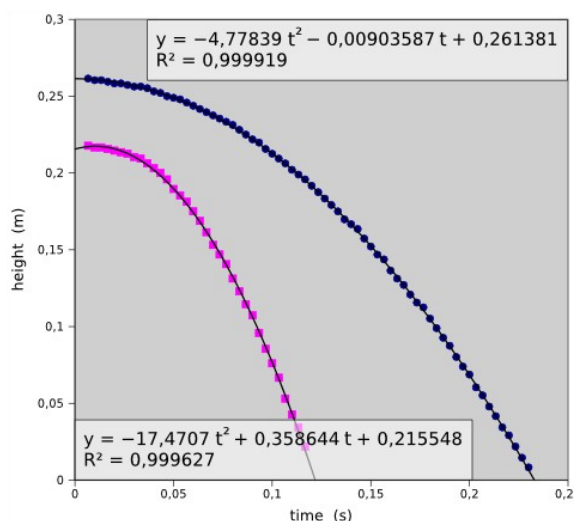


Figura 5. Gráfico obtenido del experimento de la pluma y la placa metálica (curva inferior), así como para la esfera (curva superior).

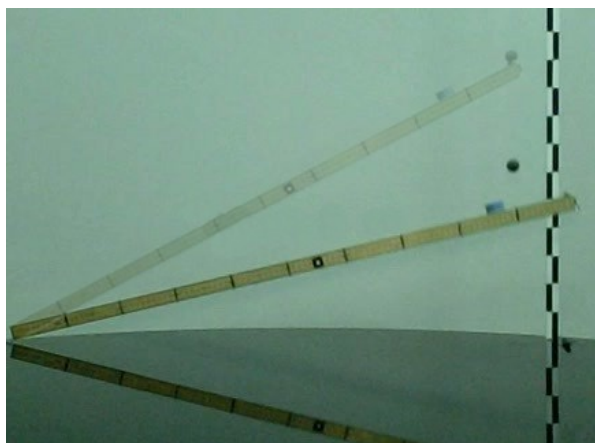
Adicionalmente, repetimos nuestra versión modificada de este experimento dejando caer una placa de metal en lugar del libro, una pluma en lugar de la hoja de papel y una esfera sobre la pluma, de manera que la placa metálica fuese forzada hacia abajo usando un resorte (Galería de Galileo 2014e). Este experimento se grabó también a 300 fps, pero cambiamos esta vez la posición de la cámara con el fin de facilitar la obtención de coordenadas de posición y tiempo a partir del vídeo, que se realiza haciendo clic sobre los objetos mostrados en la página web, para luego realizar el análisis del movimiento.

La figura 5 muestra el gráfico de la altura frente al tiempo para la caída conjunta de la pluma y la placa, y para la esfera. Después de ajustar polinomios de segundo grado obtuvimos una aceleración de  $9,6 \text{ m/s}^2$  para la esfera, y una aceleración mucho mayor, de  $34,9 \text{ m/s}^2$ , para el sistema pluma-placa. Esta gran aceleración para la pluma puede explicarse por una fuerza hacia abajo producida por diferencias de presión. Vemos así que la fuerza de arrastre por succión tiene un gran efecto sobre la pluma –o el pedazo de papel–, como consecuencia de su

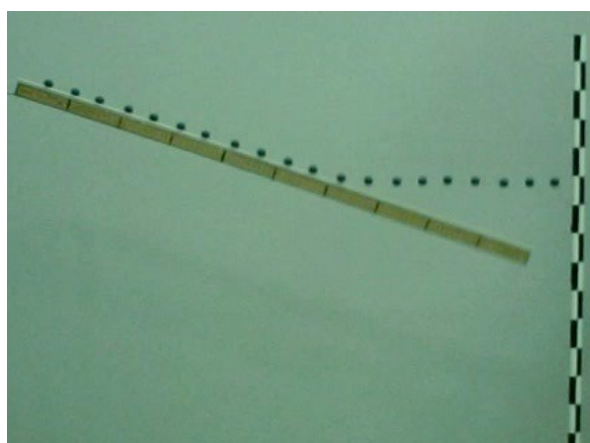
pequeña masa y gran superficie de contacto, mientras que esta fuerza tiene poco efecto en el movimiento de la esfera, debido principalmente a su mayor masa y su forma esférica.

## Una regla pivoteada

Hemos visto que el experimento en donde se deja caer un zapato y una moneda es una buena aproximación a un movimiento de caída libre y que los experimentos con objetos ligeros muestran claramente los efectos de la fuerza de fricción. Ahora vamos a mostrar un experimento sencillo en donde se deja caer una regla pivoteada en uno de sus extremos y, como consecuencia de las fuerzas adicionales a la gravedad, el resultado obtenido se aparta del esperado en un experimento de caída libre (Theron 1988, Calderón *et al.* 2011, Galería de Galileo 2014f). La regla pivoteada se libera junto a una esfera ubicada sobre su extremo libre. En el vídeo, un aumento en la separación del extremo de la regla y la esfera demuestra que el extremo libre de la regla se mueve con aceleración mayor a  $g$ .



**Figura 6.** El experimento clásico de la regla pivoteada en su extremo inferior.



**Figura 7.** Barra horizontal pivoteada en el extremo izquierdo.

El experimento que se muestra en la figura 6 se diseñó para mostrar que la esfera se aleja del extremo de la regla y llega al suelo en un momento posterior. Para poder comparar, esta imagen muestra también la regla y la esfera al inicio de su movimiento. Debido a que la esfera cae en caída libre, el experimento muestra claramente que el extremo libre de la regla acelera a una tasa mayor a  $g$ . El centro de masa de la regla está marcado por la región circular negra cerca del centro de la regla, y después de obtener las coordenadas del centro de masa es posible concluir que éste tiene una aceleración diferente a  $g$ . Este resultado es una consecuencia directa de las fuerzas adicionales que actúan sobre el punto de pivote de la regla ubicado cerca de su extremo inferior.

## Una versión alternativa de la regla pivoteada

El experimento que se muestra en la figura 7 fue diseñado para visualizar directamente la aceleración de las diferentes partes de la regla mediante la comparación del movimiento de la misma con el movimiento de varias esferas que están inicialmente en reposo sobre ella y que son libres de moverse (Galería de Galileo 2014g). En esta nueva versión, la regla se deja caer desde una posición horizontal con su extremo izquierdo pivoteado.

La aplicación de la segunda ley de Newton al estudio del movimiento de una barra de largo  $L$  pivoteada que se deja caer desde una posición horizontal da como resultado que el punto de la barra que se encuentra en una posición de  $(2/3)L$  cae inicialmente con una aceleración igual a



g. La figura 7 muestra claramente que las esferas ubicadas más allá de  $(2/3)L$  se separan de la barra, lo que confirma que diferentes puntos de la barra tienen diferentes aceleraciones y que un punto cerca de  $(2/3)L$  acelera inicialmente con aceleración igual a  $g$ .

## Un martillo que se mueve en 2D

Cuando un objeto se mueve solo en la presencia de la fuerza de la gravedad se dice que éste realiza un movimiento de caída libre. Algunos de los ejemplos anteriores mostraban movimientos en donde existían fuerzas adicionales a la fuerza de gravedad, apartándolos de un movimiento de caída libre. Para objetos extendidos que se mueven solo en la presencia de la fuerza de gravedad es su centro de masa el que sigue un movimiento parabólico, mientras que otras partes del objeto pueden realizar trayectorias complicadas.

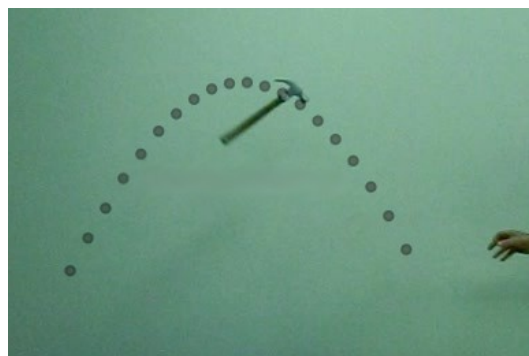


Figura 8. Un martillo en un movimiento parabólico.

La figura 8 muestra un martillo cuyo centro de masa, marcado por un punto blanco sigue una trayectoria parabólica cuando se lanza en un movimiento en dos dimensiones (Galería de Galileo 2014h). Después de obtener las coordenadas de la posición a partir del vídeo, es posible obtener la componente  $y$  de la aceleración del centro de masa, que corresponde a  $a_y = g$ .

## Resultados

Nuestro grupo ha utilizado los vídeos desarrollados, que se encuentran disponibles en el sitio del proyecto «La Galería de Galileo» junto a nuestras guías construidas en base a metodologías de enseñanza basadas en la indagación ([www.GaleriaGalileo.cl](http://www.GaleriaGalileo.cl)). Dicho material fue empleado en diversos ambientes de enseñanza a nivel universitario. Para dar una idea al lector del potencial que tiene el uso de vídeo de experimentos en conjunto con guías basadas en la indagación, mencionaremos a continuación algunos de los resultados obtenidos, sin profundizar en aspectos metodológicos o estadísticos.

Uno de los ambientes consistió en utilizar las salas de ordenadores en una configuración de un ordenador por cada uno o dos estudiantes en cursos de física de primer año universitario. También hemos utilizado estos vídeos en un aula normal, usando guías específicamente diseñadas para promover la discusión entre y con los estudiantes. Hemos usado el *Force Concept Inventory* (Hestnes *et al.* 1992), que es un test estándar que ha sido empleado de manera masiva en diversos países, y que fue diseñado para medir el avance en el aprendizaje de conceptos de los estudiantes. Este test se aplica al inicio y al final de un curso de física y permite medir la ganancia conceptual, definida como qué porcentaje de las preguntas respondidas incorrectamente al inicio del curso el alumno es capaz de responder correctamente al final de éste. Utilizando este test obtuvimos como resultado en nuestra universidad una ganancia conceptual en cursos con una metodología de enseñanza tradicional por debajo del 13 %. Este pequeño logro de aprendizaje tras una clase tradicional es consistente con los resultados reportados en literatura para este tipo de enseñanza. También se ha documentado que el uso de guías que utilizan Metodologías Basadas en la Indagación permiten aumentar estos niveles de ganancia conceptual, alcanzando valores de un 50 % o más (McDermott 1991, Hestenes *et al.* 1992, Hake 1998). Usando un ambiente de enseñanza en la configuración de un ordenador por cada uno o dos estudiantes, logramos obtener una

ganancia conceptual de un 55 %, y en la configuración en donde se muestran y discuten experimentos en vídeo en un aula normal, medimos una ganancia conceptual de un 30 %.

Buscamos así promover el uso del material presente en el sitio Galería de Galileo entre profesores de enseñanza secundaria y universitaria. Finalmente querríamos señalar la existencia de otros proyectos similares, como el proyecto Live Photo, en donde promueven también el uso del vídeo como una herramienta moderna para la enseñanza de la física.

## Conclusiones

En este trabajo hemos mostrado que el uso de vídeos de experimentos puede llegar a ser una herramienta poderosa para mejorar el aprendizaje de la física. El primer experimento mostrado es una versión simple del experimento de la torre inclinada de Pisa, donde objetos de masas muy diferentes caen lado a lado si son soltados al mismo tiempo. Los otros experimentos muestran algunos aspectos importantes que deben incluirse en una discusión sobre la importancia de otras fuerzas en el estudio de los cuerpos que caen. La mayoría de los experimentos descritos anteriormente son simples modificaciones de configuraciones conocidas, pero los experimentos mostrados en las figuras 4 y 7 son completamente originales y ponen a prueba algunos aspectos específicos de la caída libre. En particular, el experimento que se muestra en la figura 4 nos permitió evidenciar que el argumento estándar dado en la literatura para el experimento del libro y el papel estaba equivocado. Sobre este punto, téngase presente que el experimento que erradamente pretende demostrar el efecto del roce del aire sobre la caída de objetos livianos tiene más de 100 años de antigüedad. Todos los vídeos del sitio de la Galería de Galileo son de uso libre, quedando a disposición de otros educadores. Esperamos que la incorporación en el aula de vídeos de experimentos reales que han sido creados con el propósito de promover la discusión de conceptos, ayuden a un número creciente de estudiantes a comprender más profundamente conceptos claves de las ciencias.

## Agradecimientos

F.V. y R.R. desean agradecer el apoyo financiero del proyecto FONDECYT 1110713 y de la DGIP de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. R.F. agradece el apoyo financiero otorgado por el proyecto DGIP-UTFSM 281232.

## Referencias

- AAAS (1990) American Association for the Advancement of Science, *Science for all americans, a project report on literacy goals in Science, Mathematics, and Technology*. Nueva York. Oxford University Press.
- Calderón S. E., González S. L. Gil S. (2007) Determinación de la fuerza de roce con el aire usando nuevas tecnologías. *Revista de Enseñanza de la Física de la Asociación de Profesores de Física de la República Argentina XX* (1), 55-64.
- Calderón S. E., Gil S. (2011) Experimentos con objetos que caen con aceleración mayor que  $g$ . *Latin American Journal of Physics Education* 5 (2), 501-507.
- Coll C. (1996) Constructivismo y educación escolar. Ni hablamos siempre de los mismos, ni lo hacemos siempre desde la misma perspectiva epistemológica. *Anuario de Psicología* 69, 153-178.
- Einstein A. (1934) On the Method of Theoretical Physics. *Philosophy of Science* 1(2), 163-169.

- Estalella J. (2008) *Ciencia recreativa: enigmas y problemas, observaciones y experimentos, trabajos de habilidad y paciencia*. Barcelona. Ajuntament de Barcelona. Publicado originalmente en el año 1918, redición con comentarios del año 2008.
- Galería de Galileo (2014a) [Caída libre](#). Recuperado el 16 de mayo de 2014.
- Galería de Galileo (2014b) [Caída de una pluma y un martillo en la Luna](#). Recuperado el 16 de mayo de 2014.
- Galería de Galileo (2014c) [Caída de moldes de papel](#). Recuperado el 16 de mayo de 2014.
- Galería de Galileo (2014d) [Experimento del libro y el papel](#). Recuperado el 16 de mayo de 2014.
- Galería de Galileo (2014e) [Experimento del libro y la pluma](#). Recuperado el 16 de mayo de 2014.
- Galería de Galileo (2014f) [Caída de una regla pivoteada](#). Recuperado el 16 de mayo de 2014.
- Galería de Galileo (2014g) [Caída de esferas y regla pivoteada](#). Recuperado el 16 de mayo de 2014.
- Galería de Galileo (2014h) [Martillo en movimiento en 2D](#). Recuperado el 16 de mayo de 2014.
- Gluck P. (2003) Air Resistance on falling Balls and Ballons. *The Physics Teacher* 41, 178-180.
- Hake R. R. (1998) Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics* 66 (1), 64-74.
- Harlen W. (2010) [Principles and big ideas of science education](#). Recuperado el 16 de mayo de 2014.
- Hennessy S., Wishart J., Whitelock D., Deaney R., Brawn R., La Velle L., McFarlane A. Ruthven K., Winterbottom, M. (2007) Pedagogical approaches for technology-integrated science teaching. *Computers & Education* 48 (1), 137-152.
- Hestenes D., Wells M., Swackhamer G. (1992) Force concept inventory. *The Physics Teacher* 30 (3), 141-158.
- Izquierdo M. (2000) Fundamentos Epistemológicos, pp. 35-64 en *Didáctica de las ciencias experimentales*, F. J. Perales Palacios, P. Cañal de León (eds.). Alcoy. Marfil.
- Laws P. (2009) *Physics with video analysis: activities for classroom, homework, and labs using Logger Pro video analysis tools*. Beaverton, Oregon. Vernier.
- Live Photo (2014) [Live Photo](#). Recuperado el 16 mayo de 2014.
- McDermott L. C. (1991) Millikan Lecture 1991: What we teach and what is learned – Closing the gap. *American Journal of Physics* 59 (4), 301-315.
- McDermott L. C., Redish E. F. (1999) Resource Letter on Physics Education Research. *American Journal of Physics* 67 (9), 755.
- McDermott L. C., Shaffer P. S. (1992) Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity, Part I: Investigation of student understanding. *American Journal of Physics* 60 (11), 994.
- Minner D. D., Levy A. J., Century J. (2010) Inquiry-Based Science Instruction – What Is It and Does It Matter? Results From a Research Synthesis Years 1984 to 2002. *Journal of Research in Science Teaching* 47 (4), 474-496.

- Morales A., Mena J., Vera F., Rivera R. (2012) El rol del tiempo en un proceso de modelación utilizando vídeos de experimentos físicos. *Enseñanza de las Ciencias* 30 (3), 237-256.
- NRC (1996) National Research Council, *National Science Education Standards*. Washington, DC. National Academy Press.
- NRC (2000) National Research Council, *Inquiry and the National Science Education Standards: A Guide for Teaching and Learning*. Washington, DC. National Academy Press.
- Perales F., León P. (2000) *Didáctica de las ciencias experimentales: teoría y práctica de la enseñanza de las ciencias*. Alcoy. Marfil.
- PoS-Ireland (2003) Air race between identical pieces of paper, en *Physics on Stage 3 Booklet*. Recuperado el 16 de mayo de 2014.
- Pozo J. (1996) *Aprendices y maestros*. Madrid. Alianza.
- Redish E. (2003) *Teaching physics: with the physics suite*. Hoboken, NJ. John Wiley & Sons.
- Romero M., Quesada A. (2014) Nuevas tecnologías y aprendizaje significativo de las ciencias. *Enseñanza de las Ciencias* 32 (1), 101-115.
- Russo L. (2004) *The forgotten revolution: how science was born in 300 BC and why it had to be reborn*. Berlín. Springer.
- Shaffer P. S., McDermott L. C. (1992) Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity. Part II: Design of instructional strategies. *American Journal of Physics* 60 (11), 1003-1013.
- Thacker B., Kim E., Trefz K., Lea S. (1991) Comparing problem solving performance of Physics students in inquiry-based and traditional introductory Physics courses. *American Journal of Physics* 62 (7), 627-633.
- Theron W. F. D. (1988) The “faster than gravity” demonstration revisited. *American Journal of Physics* 56, 736.
- Tracker (2014) [Tracker](#). Recuperado el 16 de mayo de 2014.
- Vera F., Rivera R. (2011) A piece of paper falling faster than free fall. *European Journal of Physics* 32 (5), 1245-1249.
- Vera F., Rivera R., Nuñez C. (2011) Burning a candle in a vessel. A simple experiment with a long history. *Science & Education* 20, 881-893.
- Vera F., Romanque C. (2009) Another way of tracking moving objects using short video clips. *The Physics Teacher* 47(6), 370-373.
- Vernier (2014) [Vernier Logger Pro](#). Recuperado el 16 de mayo de 2014.
- Wikipedia (2014a) [Harold Eugene Edgerton](#). Recuperado el 16 de mayo de 2014.
- Wikipedia (2014b) [Eadweard Muybridge](#). Recuperado el 16 de mayo de 2014.
- Young R. (2001) Improving the data analysis for falling coffee filters. *The Physics Teacher* 39, 398-400.