

# LO QUE ME CONTO AVOGADRO

Darío Moreno

Departamento de Física  
Facultad de Ciencias-UNAM

## RESUMEN

Se critican los tipos de prácticas más comunes en los laboratorios de enseñanza y se muestra que son especialmente peligrosas aquellas prácticas destinadas a medir constantes fundamentales.

A modo de ejemplo se analiza un "experimento" destinado a medir el número de Avogadro. Como consecuencia de este análisis se concluye que quizás los únicos que aprenden algo de física a partir de ellos, son los autores de los experimentos.

Se propone una manera de evitar estos inconvenientes y de diseñar actividades de laboratorio con mayor valor educativo.

## ABSTRACT

A criticism is made of the most usual type of teaching laboratory practice. It is shown that experiments designed for measurements of fundamental constants are specially dangerous.

As an example, an analysis is made of an "experiment" to determine Avogadro's number and the argument it presented that probably the only one to learn some physics from this type of experiment, is the physicist who wrote it.

A proposal is made to turn around this drawback and to produce some laboratory activities with more educational value.

En primer lugar, y muy sinceramente, deseo agradecer a los organizadores de este Congreso por el honor conferido al invitarme a dar esta charla ante ustedes; en segundo lugar, quiero pedir disculpas por el título tan poco académico que elegí. Bien sé que un título que se respete debe ser lo suficientemente explícito para que uno pueda darse cuenta por anticipado de qué se trata, evitándose así asistir a charlas que a uno no le interesan. Voy a leer cómo debería haber sido el título, de modo que puedan irse los que aquí están, al menos en cierta forma, por engaño. El título expandido de este trabajo debiera ser algo así: "Críticas variadas a la enseñanza habitual de la física, con cierto énfasis en lo que se hace en los laboratorios, y con referencias de pasada a otros asuntos colaterales".

Aclarado este asunto del título -y alentado porque aparentemente todos piensan quedarse- entremos en el tema. Cuando se me invitó a venir a Jalapa y hablarles de lo que yo quisiese, había que elegir de inmediato un título. En ese momento yo venía saliendo de la biblioteca, en la que había leído un trabajo publicado en el Journal of Chemical Education por un señor G.P. Mathews de la Universidad de Oxford<sup>(1)</sup>.

Les cuento esto para que quede claro desde el principio que mis críticas no van dirigidas a los laboratorios de enseñanza en que quizá algunos de ustedes trabajan, sino a laboratorios de otras latitudes. Mal podría criticar los laboratorios de ustedes, ya que no los conozco.

El tema elegido arranca de ese trabajo de Mathews, en que se describe cómo determinar el número de Avogadro sin pena ni gloria. Aunque los laboratorios de Inglaterra tienen muchas cosas buenas, voy a hablar mal de la enfermedad representada por el trabajo de Mathews. Creo que esta estrategia me permitirá conservar la amistad de ustedes, y tiene además el mérito de que es mucho más fácil ver la paja en el ojo ajeno que una viga en el propio.

¿Porqué mi molestia con el trabajo de Mathews? Uno de mis traumas más viejos y profundos tiene que ver con mi molestia al ver como se falsifica a la física cuando se la enseña. Uno "falsificar" no en el sentido popperiano, sino más informalmente. Quiero decir que en general los alumnos se quedan con una errónea idea de lo que es la física y de cómo se hace física. En especial, el trabajo de Mathews deja la impresión de

que el físico experimental anda tras los físicos teóricos pidiéndoles fórmulas. Una vez que tiene una fórmula en la mano, mide todas las variables menos una -a la que calcula-, y listo. Me he encontrado con alumnos que vienen saliendo de un laboratorio en que acaban de determinar el número de Avogadro, y a los que les he pedido que me convenzan de que "existen" los átomos o moléculas y son incapaces de hilvanar un argumento, y aún menos pueden contra-atacar exigiéndome que les aclare qué quiero decir con "existen".

Poco a poco iré dando detalles del "experimento" que propone Mathews, pero les adelantaré que en mi opinión no corresponde a mi definición de "experimento". A lo más es un ejercicio, y lo que ciertamente es, es una sesión de entrenamiento de la disciplina, ya que casi lo único que hacen los alumnos es seguir detalladas instrucciones.

Antes de seguir adelante, permítanme una pequeña digresión. Hay gente experta en clasificar cosas, y han clasificado a los laboratorios de enseñanza en varios tipos:

- Laboratorios tradicionales
- Laboratorios convergentes
- Laboratorios abiertos
- Laboratorios divergentes
- etc.

Si yo fuese un extremista, a la lista anterior agregaría "Laboratorios inútiles". No voy a hacer eso, sino que voy a proponer que a la lista anterior se agregue una variedad muy común pero aún no bautizada. Propongo que a estos laboratorios los llamemos "González vs el National Bureau of Standards", González vs el Instituto de Física" o como ustedes prefieran. Lo que caracteriza a estos laboratorios es lo siguiente: 1) El objetivo es determinar una constante fundamental (cuyo valor aparece en muchas tablas ya conocidas por González); 2) González es apenas un "aprendiz de brujo", es decir, es un alumno de licenciatura; y 3) de hecho González se encuentra en competencia con un equipo de físicos profesionales que son los que encontraron el valor que ahora aparece en las tablas. Claro que González tiene una serie de ventajas sobre sus opositores: tiene todo el equipo a la mano (mientras que los investigadores a veces tienen que construirse o pelear por el dinero para comprarlo), además tiene

una guía de laboratorio (cosa que tampoco tienen sus opositores) y dispone de excelentes ayudantes. No hay que maravillarse entonces de que González haga una excelente medición en un par de horas, mientras los otros demoran un par de meses.

El "experimento" que propone Mathews es del tipo que acabo de describir. A los alumnos que entran al laboratorio se les tira por la cabeza una fórmula mágica, algo así como  $\langle \Delta x^2 \rangle = RT/3\pi\eta r N_0$ , y se les asegura que ellos podrán medir todo menos  $N_0$ , de modo que podrán descubrir cuánto es el número de Avogadro.

¿Qué se hizo la "física, aventura del pensamiento"? ¿En qué degeneró ese "pas de deux" entre teoría y experimento con el que algunos comparan a la física? Degeneró en una serie de instrucciones tan detalladas y en tantas precauciones tomadas de antemano, que podemos garantizar el éxito de González.

Por supuesto, para conseguir lo anterior, Mathews tuvo que trabajar bastante. Con cierta seguridad podemos suponer, para empezar, que él sí es capaz de deducir la fórmula mágica y que conoce sus limitaciones. Podemos suponer también que gastó bastante tiempo en elegir las "partículas" que realizarían el movimiento browniano, y que para simplificar el análisis de los datos, buscó hasta encontrar quien lo proveyese de esferitas de latex de diámetro "conocido" con variabilidad supuestamente cero. También gastó bastante tiempo en encontrar la concentración óptima en que debía usar estas esferitas en su suspensión, cómo controlar la temperatura, cómo leer la posición de las esferitas en el graticulo del microscopio, etc., etc. En resumen, podemos asegurar que mientras Mathews preparó su "experimento", él sí trabajó realmente como un físico, y aunque el tema es antiguo, es probable que haya aprendido cosas nuevas al revisar la literatura, pues aún se sigue trabajando en él. Es muy probable, además, que Mathews se haya entretenido mientras preparaba su "experimento". ¿Porqué todo esto cambia de signo cuando se trata de "formar a las nuevas generaciones"? ¿Es esto inevitable, debido a que nuestras vidas son finitas?

Yo sostengo que en los experimentos del tipo "González versus el National Bureau of Standards", el único que se divierte y aprende es el profesor que los prepara, y quizá en esto mismo se esconde una alternativa

tiva utilizable: cada futuro licenciado debería trabajar como Mathews preparando un "experimento" en forma completa y exigente, hasta redactar la guía de laboratorio y verificar que funciona. Luego, esa guía de laboratorio debería ser quemada en una ceremonia apropiada, si se quiere, con acompañamiento de mariachis.

Esto de que el constructor es el único que se divierte y aprende, también corre el peligro de ocurrir en los programas de simulación mediante computadoras, sobre todo si los programas se conciben como "cajas negras", o espectáculos para ser simplemente contemplados por los alumnos. En estos casos es muy fácil escribir programas a partir de las fórmulas que dan los resultados finales y no las ecuaciones que describen la evolución del proceso. Como ejemplo de esto último puedo mencionar el trabajo de Mishima, Yamakoshi, Minowa y Goto<sup>(2)</sup>, en el que describen la simulación de un movimiento browniano bidimensional. Creo que la lectura de este trabajo muestra que estos japoneses sí entienden el movimiento browniano; lo que me parece dudoso es que los alumnos que usen este programa logren la comprensión óptima. Aclaro que no pretendo negar la utilidad de las computadoras en la enseñanza -de hecho es una de mis entretenimientos- pero pienso que es necesario tomar ciertas precauciones para que no degeneren en espectáculos a ser contemplados pasivamente. Un recurso que asegura comprensión es que sea el propio alumno el que escriba los programas, ya que ahora existen lenguajes de computación que se aprenden en unas pocas horas.

El tema del trabajo de Mathews me permite tocar otros que son muy populares en los laboratorios: movimiento browniano, azar, fenómenos aleatorios, probabilidades, cálculo de errores. Como parte de la falsificación de la física, al pobre principiante se lo intimida con el cálculo de errores. Se lo intimida, porque no está preparado para él y se lo obliga a usarlo dogmáticamente. De nuevo la falsa imagen: el físico experimental pasa un cuarto de hora midiendo en el laboratorio y cuatro horas haciendo cálculo de errores.

Si lo pensamos bien, el asunto puede ser más grave aún. Casi toda la teoría que de algún modo se presenta a los estudiantes, está basada en la hipótesis de una distribución gaussiana de las medidas. ¿Qué seguridad hay que las medidas de González tengan una distribución gaussiana?

Ninguna. Por otra parte, puesto que González tiene que terminar su "experimento" en dos horas, González tiene que limitarse a tomar pocos datos. Las recetas que se dan en los laboratorios de enseñanza, ¿son las más adecuadas para muestras pequeñas?

Nadie está a cubierto de desgracias, y un mal día podría ocurrirnos lo siguiente. Se nos acerca un González y nos dice: "mi tío es matemático, y me dice que si  $X$  y  $Y$  tienen una distribución normal, entonces  $Z = X/Y$  tiene una distribución de Cauchy, y por lo tanto, la varianza de  $Z$  no está definida. Yo estuve midiendo masas y volúmenes para determinar la densidad, ¿qué error les pongo?". Mi pregunta es: ¿estamos preparados para enfrentar a este González? Puedo asegurarles que este González existe, no es un González ficticio, y puedo asegurarles también que habría muchos más González de este tipo si la enseñanza no fuese tan dogmática y autoritaria.

Quiero volver a la idea de "experimento" y contrastarla con la noción de "ejercicio". Ustedes no lo han notado, porque no sé pronunciar las comillas, pero cada vez que hablo de laboratorios de enseñanza, digo experimentos entre comillas. Ustedes saben que jugar futbol puede ser muy entretido, y que no lo es tanto el simplemente hacer calistenia en el borde de la cancha. Nuestros alumnos hacen solamente ejercicios -calistenia al borde de de la cancha- y casi nunca tienen la posibilidad de hacer experimentos, o en mi analogía, casi nunca les damos la posibilidad de entrar a la cancha y divertirse. Nuestras disculpas pueden ser muchas; por ejemplo una de las más doctas es que todas las mediciones son dependientes-de-una-teoría, de modo que el alumno realmente no podrá experimentar si no conoce bien la teoría. Aunque en principio comparto el argumento anterior, no puedo compartirlo cuando se trata de enseñar a otros, por los excesos a que conduce.

En algunos lugares, los profesores han inventado una especie de purgatorios que se llama "pre-laboratorio", y por si no lo conocen, se los voy a describir con la esperanza de que nunca lo hagan. Un profesor cree que es muy importante que sus alumnos aprendan a medir "g", y para asegurarse que realmente estarán entendiendo lo que hagan en el laboratorio, decide que los ayudantes de laboratorio deben interrogar a los alumnos antes de entrar a sus dominios. El interrogatorio puede ser oral o escrito, pero las preguntas son del siguiente tipo: ¿qué es aceleración?

¿qué relación hay entre distancia y tiempo en un movimiento uniformemente acelerado?, ¿qué relación hay entre el largo de un péndulo, la aceleración de gravedad y su período?, ¿a lo más cuantos grados deber ser la amplitud de oscilación del péndulo? Si el alumno no contesta satisfactoriamente, no puede entrar al laboratorio. Nunca he sabido porqué en el prelaboratorio no se pregunta también: ¿cuánto es  $g$ ? Si se lo hiciese podríamos ahorrar bastante dinero, y quizás hasta habría gente que quisiese ser físico experimental por pura curiosidad.

Creo que uno de los grandes desafíos es imaginar "experimentos" que resulten verdaderos experimentos para los alumnos. Aunque no sea el caso para un físico profesional (el que puede incluso adelantar la forma del espectro que va a encontrar, o el orden de magnitud de la variable que le interesa), para el alumno que comienza a recorrer la ciencia, la palabra "experimento" está asociada a la noción de sorpresa y de juego:  cambiemos esto para ver qué pasa. Bien sé que hay gente muy seria que piensa que la ciencia es muy seria y que los simples juguetes ("cambiemos esto para ver qué pasa"), no tienen cabida en ellas. Sé también que eso no es cierto, y aunque lo fuese, creo que no es lo que debe guiarnos al enseñar. Un ejemplo: enseñamos la ley de Snell en el pizarrón; luego al laboratorio para ver si es cierta (?), luego a medir índices de refracción que no nos interesan en absoluto mediante diecisiete métodos distintos. Imaginemos una situación distinta. Usted, mediante su método preferido, enseña la ley de Snell. Luego va al laboratorio y entrega al alumno, "para que juegue" con la ley de Snell, un cristal de calcita o alguna otra cosa birrefringente. ¿Verdad que en el laboratorio las cosas tomarían otro sabor?

Hago pues una petición: diseñemos situaciones en que el alumno tenga la oportunidad de realizar al menos una vez antes de graduarse, un EXPERIMENTO. No prohibamos pensar en el laboratorio, ni nos asuste que una tarde entera se discuta de teoría sin hacer ninguna medición, ni que se gaste una tarde el mejorar el diseño.

No nos dejemos paralizar por la interdependencia teoría-experimento entendida en forma extrema. Yo no soy de los que cree que uno puede demostrar en el laboratorio de enseñanza que  $\vec{F} = m\vec{a}$ ; creo que puedo distinguir bien entre postulado, definición, teoría y ley empírica, y co

mo ustedes también pueden hacerlo y son buenos físicos, ustedes también pueden inventar experimentos útiles para los que están aprendiendo a ser buenos físicos.

Para finalizar, volvamos a Avogadro y desentrañemos lo que él me dijo con la ayuda de mi medium, Juan Manuel Lozano: "Mi número me ha hecho famosos, a pesar de que me morí sin conocerlo, y por lo que veo, hoy día el volverlo a medir una vez más, no trae fama".

Pero hay algo que sí podría traer si no fama, al menos una gran satisfacción personal a cualquier alumno de licenciatura. Para esto, bastaría que le contásemos como desafío la siguiente historia: un noble señor (Lord), de apellido Rayleigh y de visita en Suiza, observó que él podía distinguir nítidamente la cumbre de montañas que él sabía estaban a 40 km. de distancia, y se dió cuenta que a partir de esta observación él podría obtener el número de Avogadro. Aunque esto es un desafío principalmente teórico, creo que es posible e importante que encontremos desafíos similares en el campo de la física experimental.

#### REFERENCIAS

1. G.P. Mathews, "Brownian motion: an undergraduate laboratory experiment" University of Oxford Chemistry Laboratory, Journal of Chemical Education, 59, No. 3 (1982) 246.
2. Nobuhiko Mishima, Tomio Yamakoshi Petrosky, Hiroaki Minowa y Suteo Goto. "Model experiment of two-dimensional Brownian motion by microcomputer". American Journal of Physics, 12, No. 48 (1980) 1050.