

# **Evolucionar para sobrevivir -**

## **Una lección sobre la dinámica de fluido a través del sistema urinario**

[HAY MÚSICA EN EL FONDO]

DAVID HU: Estamos en el Parque Zoológico Frank de Boston, Massachusetts y yo soy David Hu, un profesor asociado de ingeniería y biología del Instituto Tecnológico de Georgia. Mi laboratorio está interesado en cómo se mueven los animales, por dentro y por fuera. Tal vez recuerdas mi lección BLOSSOMS sobre sancudos en el 2013.

Hoy, vamos a contemplar cómo un animal desecha fluido de su cuerpo. En particular, evaluaremos el sistema urinario, que funciona igual de bien para un ratoncito como para la jirafa grande que se encuentra justo detrás de mí. Nuestros cuerpos son hechos principalmente de fluido. Para que el cuerpo funcione correctamente, el fluido tiene que ser ingerido y también tiene que ser excretado. Estos sistemas funcionan tan bien que son, de hecho, subvalorados. En realidad, son el resultado de un proceso de afinación que se ha llevado a cabo tras millones de años de la evolución.

Tu sistema urinario también es un sistema evolucionado. Los años de la evolución han generado un sistema urinario que funciona tan bien que ni siquiera nos fijamos en él. No nos damos cuenta de lo bien que funcionan estos sistemas hasta que se nos descomponen. Los problemas médicos con el sistema urinario incluyen las piedras en el riñón, infecciones urinarias y el cáncer de la próstata. Muchos de estos problemas son difíciles de diagnosticar porque el sistema urinario está escondido dentro de tu cuerpo.

Hoy, vamos a presentarte una manera fácil de describir la salud de tu sistema urinario. Nosotros también investigaremos cómo la evolución ha ayudado a que los animales resuelvan una variedad de problemas. Un aspecto maravilloso de la evolución es la amplia variedad de tamaños corporales que se han desarrollado. Incluye un rango de masas de 1.000, desde un perrito que sólo pesa unas libras a un elefante que pesa varios miles de libras.

El mismo sistema urinario que le sirve bien al perrito también tiene que servirle al elefante. Imagínate diseñar una pistola de agua y un hidrante utilizando el mismo conjunto de genes. Esta es la tarea que la naturaleza tiene que enfrentar cuando crea sistemas para una gran variedad de animales usando la evolución.

Hoy vamos a estudiar el sistema urinario. El sistema permite que animales tan grandes como este león suelten galones y galones de fluido a caudales enormes. Permite que estos animales lo hagan rápidamente para evitar la depredación y ser comidos por presas más grandes. Entonces, permíteme presentarte a mi asistente, Patricia Yang, que va a presentar nuestro primer experimento.

PATRICIA YANG: Vamos a vaciar una botella de plástico. ¿Cuánto tiempo tardará? ¿Cuáles son las fuerzas involucradas en vaciar una botella?

DAVID HU: Gracias por medir el tiempo que tarda para vaciar la botella de plástico. Notamos que la botella de plástico se vacía debido a la fuerza de la gravedad, y tarda más o menos seis segundos. Sabemos que la gravedad actúa sobre objetos sólidos como estas llaves. Mi mano las sube. La gravedad las hace caer de nuevo.

PATRICIA YANG: La gravedad es la fuerza que jala las partículas de fluido hacia el punto más bajo del piso.

DAVID HU: Ahora, imagínate que el líquido en esta botella de plástico consiste de muchas bolas pequeñas llamadas partículas de fluido. La gravedad está actuando sobre cada partícula de fluido y quiere que lleguen al punto más bajo, un charco en el suelo. Entonces, la cosa interesante de los fluidos es que pueden transmitir las fuerzas de maneras sorprendentes. Nosotros vimos que la botella de plástico se vació más rápido aún cuando se la sostiene verticalmente.

He abierto agujeros en estas dos botellas con un taladro, uno en la parte de al lado y el otro en la parte de abajo. Entonces, agarra las botellas y mide el tiempo que tarda para vaciarlas cuando están horizontales y verticales. ¿Cómo se vacía más rápidamente la botella? ¿Por qué?

Gracias por medir el tiempo que tarda para vaciar estas botellas. Recuerda, ambas tienen el mismo volumen. Pero la botella que estuvo vertical se vació más rápido. Para medir cuán rápido sale el fluido de la botella, primero vamos a observar el caudal, también conocido como caudal volumétrico  $Q$ . La unidad de medida  $Q$  es volumen por tiempo, por ejemplo, litros por segundo. En cuanto más alto el caudal volumétrico, más volumen sale de la botella por segundo.

Por ejemplo, el cabezal de tu ducha tiene un caudal de un quinto de litro por segundo. El caudal volumétrico está relacionado con el volumen del contenedor y el tiempo que se tarda para vaciarlo según la ecuación  $Q$  iguala el volumen dividido por el tiempo, donde  $Q$  es el caudal,  $V$  es el volumen del contenedor y  $T$  es el tiempo que tarda para vaciarlo.  $Q$  es el caudal promedio durante el tiempo que tarda para vaciarse el contenedor. Como ahora sabemos el valor de  $Q$ , el caudal volumétrico, podemos estimar la velocidad de flujo  $U$ .

Esta es la velocidad de las partículas individuales del fluido. Imagínate que la sección trasversal de tu tubo fuera una carretera y las partículas de fluido estuvieron fluyendo por la carretera para salir del tubo. La relación entre  $Q$ , el caudal, y  $U$ , la velocidad de flujo, iguala a la ecuación  $Q$  iguala a  $U$  multiplicada por  $A$ , donde el área  $A$  es  $\pi R^2$ , o el área trasversal de un tubo circular con el radio de  $R$ .

Ahora que has calculado la velocidad de flujo, por favor, considera la relación entre la velocidad de flujo y la altura de tu contenedor. Observarás que la velocidad aumentará con la altura del contenedor, pero de forma muy gradual. Esta ecuación se llama la ley de Torricelli y fue descubierta en 1643 por el físico italiano Evangelista Torricelli.

Toricelli también inventó el barómetro, que se usa para medir la presión atmosférica. Esta ley dice que la relación entre la velocidad del fluido y la altura del contenedor desde el cual el fluido es vaciado es  $U$ , y  $U$  es igual a la raíz cuadrada de 2 veces la gravedad multiplicada por  $L$ , en el cual  $U$  es la velocidad de flujo saliendo del contenedor,  $G$  es la aceleración de la gravedad y  $L$  es la altura del fluido dentro del contenedor.

La razón por este fenómeno tiene que ver con la presión en la parte de abajo de la botella. Hay más presión en una botella vertical por el peso del fluido que presiona hacia abajo. En cuanto más alta la presión, más alta la velocidad de flujo del líquido que está saliendo. Entonces, usando la ecuación que has aprendido, calcula cuánto tiempo tardará vaciar la botella como función de su forma, su volumen, su altura, y el área del agujero de abajo y la aceleración de la gravedad  $G$ . En nuestra próxima lección, vamos a utilizar la relación entre la masa corporal y la forma de la vejiga para predecir cuánto tiempo tardará para que una gran variedad de animales vacíen sus vejigas.

En nuestra última lección, aprendimos que el tiempo que tarda para vaciar un contenedor tiene que ver con su volumen y la velocidad de flujo, ambos. La velocidad de flujo está relacionada, por consiguiente, con la altura del contenedor según una relación que anteriormente aprendimos llamada la ley de Torricelli. Este es un resultado importante, y lo usaremos a lo largo de esta lección. Tú probablemente no pensabas que había la presencia de tanta física en un simple vaciado de contenedor. Pero el puro hecho de que este fenómeno es tan familiar no quiere decir que se entiende bien.

En la actividad anterior, aprendiste cómo calcular el tiempo que tarda para vaciar un contenedor. Este tiempo dependía de la forma del contenedor, específicamente de su altura y el tamaño del agujero. Así que la forma de un contenedor puede afectar el tiempo que tarda para vaciarse. ¿Qué efecto tendrá este fenómeno de la física en el vaciado de órganos llenos de fluidos en la naturaleza?

De hecho, hay muchos órganos llenos de fluidos dentro del cuerpo. Incluyen el sistema cardiovascular, el sistema linfático, el sistema digestivo y el sistema urinario. En este último ejemplo, el fluido es la orina, la cual tiene propiedades, tales como la densidad y la viscosidad, que son bastante parecidas a las del agua. Esta característica hace que el sistema urinario sea el que mejor responde a los métodos de modelación que hemos estudiado.

En la naturaleza, hay una variedad bastante grande de tamaños de vejiga. Varían desde el tamaño de una taza al de un cubo de basura, que contiene casi 20 litros. Es un rango de volumen de más de 100 veces. En tus experimentos, sólo variaste el volumen de tus contenedores por un factor de cinco. Debido al rango tan grande de volúmenes, es mejor usar la teoría para predecir la velocidad del vaciado de estos contenedores.

Pero, al usar la teoría, tenemos que elegir una sola variable para determinar cuán rápido vacía un animal su vejiga. Nosotros observamos previamente que hay dos variables, el tiempo que tarda para vaciarla y el caudal. Vamos a usar el tiempo porque es más fácil de medir. Hemos medido el tiempo del vaciado de varias vejigas dentro de la naturaleza, desde un perro a un elefante.

Los datos se ven aquí. La línea discontinuada indica el mejor ajuste para todos estos periodos medidos de la urinación. Tú verás que hay un rango limitado de tiempo, entre cinco y 30 segundos, que encapsula todos estos datos. Es una gama pequeña, tomando en cuenta el rango de tamaños de vejigas de un factor de 100. La relación entre el tiempo y la masa corporal es igual a  $k$  multiplicada por  $M$  al 0.13 poder.

Lo llamamos la ley de la urinación o la ley de oro. La magnitud pequeña del exponente significa que el tiempo de la urinación cambia muy lentamente al aumentar la masa corporal. Nosotros te proveemos los volúmenes de las vejigas, los diámetros de las uretras y las longitudes de las uretras de tres animales en esta tabla. Por favor, para cada animal estima cuál es la velocidad de flujo, el caudal y el tiempo que tardan para vaciar sus vejigas.

Acabas de calcular los tiempos de vaciado de la vejiga de tres animales de tamaños inmensamente diferentes--un perro, una vaca y un elefante. Averiguaste que el tiempo que tardaron para vaciarlas fue bastante parecido, todo alrededor de 20 segundos, a pesar de la variación enorme entre los volúmenes de sus vejigas, que tiene un factor de más de 100. Es un resultado bastante inesperado ¿verdad? Uno esperaría que vejigas más grandes requieran más tiempo para vaciarse. Sin embargo, eso también significaría que animales más grandes correrían más riesgo de convertirse en presa.

De hecho, nuestro experimento demostró que todos los mamíferos tardan aproximadamente el mismo tiempo para orinar. ¿Cómo es que animales con tamaños tan variados de volumen de vejiga tardan el mismo tiempo para orinar? Hay dos respuestas. Vamos a usar la uretra de un elefante como ejemplo. La uretra de un elefante tiene dimensiones más o menos iguales a las de tu brazo. Es alrededor de 10 veces más ancho que la uretra de un perro.

Es como una carretera. En cuanto más ancha la carretera, más carriles tiene. En cuantos más carriles tiene, más carros pueden pasar. Entonces, por segundo más carros pasan por la uretra. Es uno de los diseños que provoca que el elefante aumente su caudal. La segunda razón es más sutil. Como mencioné, la uretra del elefante es más o menos así de larga.

En cuanto más alta la uretra, más grande la fuerza de la gravedad y más grande la presión que impulse el flujo. En cuanto más presión, más rápido se mueven los carros. Entonces, no sólo hay más carriles, sino que cada carro conduce más rápido. Esta combinación de un área trasversal ancha y una altura muy grande permite que la uretra del elefante expulse 20 litros en sólo 20 segundos.

Tiene el mismo caudal de cinco cabezales de ducha. También hemos descubierto cuál es el propósito de la uretra. Es una válvula biológica. Sus dimensiones geométricas afectan la velocidad que tiene el flujo al salir de la vejiga. Específicamente para el elefante, la longitud de un metro de la uretra del elefante amplifica la fuerza de la gravedad, que aumenta la velocidad que tiene la orina cuando es expulsada del elefante.

Este método no sólo se limita a los animales. También se puede aplicar a los sistemas diseñados. En nuestra próxima actividad, vamos a demostrar que se puede construir una torre de agua de un volumen arbitrario que puede ser vaciada en un periodo muy corto de tiempo.

Hasta ahora, el contenedor más grande que hemos considerado sólo era de 20 litros. Nuestra última actividad del día será investigar cuánto tiempo tardará para vaciar una torre de agua. Piensa en torres de agua de volúmenes de 100, 1.000 y 10.000 litros. ¿Qué forma de tubo colocarías por debajo de esta torre para asegurarse de que todo el fluido salga en 20 segundos?

Hay muchos métodos para sacar fluidos rápidamente. Por ejemplo, muchas veces en edificios los apartamentos usan agua a la misma vez, por ejemplo, cuando las personas necesitan ducharse. Entonces necesitamos una manera rápida de soltar el agua. También podrías imaginar un sistema de riego que utilice la misma técnica.

Nosotros podemos usar estos principios para diseñar nuevas bombas que expulsen fluido tan rápido como queramos. Podemos controlar la velocidad sin utilizar válvulas. Llamamos a este concepto un sistema hidrodinámico escalable. Se puede utilizar este concepto de un sistema hidrodinámico escalable para diseñar depósitos portátiles, tales como torres de agua, tanques de almacenamiento y mochilas de hidratación.

Ojalá que hayas disfrutado esta lección de BLOSSOMS, evolucionar para sobrevivir. Animales como estos pueden inspirar el diseño de todo tipo de aparatos nuevos. Si estás pendiente, tal vez te inspires la próxima vez que vayas al zoológico.

Gracias por considerar el uso de esta lección BLOSSOMS para tu clase. En cuanto los prerequisites, los estudiantes deben estar algo familiarizados con la física básica. Pues, deben saber lo que es la velocidad, específicamente sus unidades de distancia por tiempo. Eso es importante porque, durante esta lección, para averiguar el tiempo que tarda para vaciar una vejiga, hay que calcular la velocidad que tiene el fluido.

También deben saber usar una calculadora. En esta lección, proveemos diferentes valores biológicos para la geometría de este sistema urinario, el volumen de la vejiga, la longitud de la uretra y la anchura de la uretra. Y van a tener que marcar estos números en una calculadora o, mejor aún, en una hoja de Excel y averiguar la duración de la urinación usando las ecuaciones que hemos proveído. Pues tienen que tener algunas habilidades básicas para manipular varios números, y diferentes números juntos para efectuar un cómputo.

Pero no habrá ningún cálculo en esta lección, sólo estaremos usando álgebra, algo de multiplicación y división. Y creo que son los únicos conocimientos que tienen que tener. No les hace falta ninguna experiencia con la biología, en realidad. Vamos a proveerles todos los variables biológicos, pero sí tienen que estar algo familiarizados con el uso de los números.

La lección BLOSSOMS tiene varios objetivos de aprendizaje. El primero es aprender usar una amplia variedad de unidades y números. Para calcular la velocidad de la urinación, tendrán que manipular un par de variables diferentes--longitudes, velocidades, tiempos, la aceleración provocada por la gravedad. Y tienen que mantener una noción clara del significado de cada unidad. Pues aprender esto ayudará a enseñarles cómo manipular variables que representen varios tipos de unidades.

Otro objetivo es poder comparar sus cálculos a la vida real. Y esto es muy importante. Es lo que muchos científicos hacen. Y la parte buena de esta lección es que tenemos experimentos que son muy fáciles de hacer. Entonces los estudiantes realmente podrán hacer el experimento ellos mismos y medir el tiempo que tarda para vaciar estas vejigas de mentira. Y entonces podrán calcular cuánto tiempo debe tardar.

Así pues, el poder comparar los datos de la vida real con los cálculos es otro objetivo importante para aprender en esta lección. Entonces permíteme darte unas sugerencias sobre cómo coordinar esta lección. Lo que me gusta de esta lección es la facilidad de los experimentos. Estos experimentos no podrían ser más fáciles. Sólo hay que conseguir unos contenedores y utilizarlos para realizar estos experimentos.

Entonces, sugiero que tú los practiques por cuenta propia primero porque los experimentos son fáciles pero pueden mojar. Quiero decir que habrá agua por todas partes. Entonces, asegúrate de que hayas guardado todos los enchufes y cosas así cuando vayas a realizar estos experimentos. Pero creo que los estudiantes también disfrutarán esa parte de la lección.

Sugiero que los estudiantes trabajen en equipos de por los menos dos, porque el proceso de hacer estos experimentos requiere una persona, en realidad, para mantener el contenedor y abrir el tapón. Y requiere que otro estudiante maneje el cronógrafo, básicamente--tal vez pueda utilizar su celular para medir el tiempo que tarda el fluido para salir y anotar el resultado. En realidad requiere dos pares de manos. La cosa buena de esta lección es que los estudiantes realmente pueden hacer los experimentos ellos mismos, y el equipo es mínimo.

Entonces estos experimentos son realmente muy sorprendentes porque hay contenedores diferentes y hay muchas maneras de vaciar estos fluidos. Entonces permíteme mostrarte un poquito sobre cómo--entonces un estudiante me construyó estos contenedores. Pero creo que tú probablemente podrías hacerlo fácilmente o reclutar a alguien para ayudarte hacerlo. Pues los que usamos justo al principio de la lección eran estos mismísimos modelos. Preferimos usar botellas transparentes porque así uno realmente ve con más facilidad cuando el fluido termina de vaciarse.

Entonces cuando haces unos de estos, lo que hacemos es sacar las etiquetas y entonces simplemente tomas un taladro y taladras. Por ejemplo, en este, si recuerdas, se vaciaba el fluido horizontalmente. Abrimos dos agujeros, uno para drenar el fluido y el otro para permitir que el aire entre. Y esa básicamente es la regla que usamos para todas las botella que hacemos. Tú tienes un agujero para que el aire entre. Si no, se acumula la succión, lo cual genera problemas de flujo. Y es porque las vejigas verdaderas que existen en la naturaleza son plegables mientras todas las cosas aquí son rígidas.

Pues ésta tiene dos agujeros que la atraviesan completamente. Él de la botella vertical sólo tiene un agujero en la parte de abajo, entonces las podemos sostener así y los estudiantes pueden medir el tiempo. Tienes que recordar de asegurarte de que los estudiantes las sostengan derechas. Si los estudiantes las sostienen a un ángulo, afectará el tiempo. Pues, asegúrate de que sólo estén sostenidas horizontal y verticalmente.

Otra cosa sorprendente de esta lección es que los métodos que utilizamos funcionan para cualquier tamaño de contenedor, desde estas botellas plásticas que usamos anteriormente a las muy grandes. Esta es una jarra de un galón que usamos. Otra vez, tú tienes un agujero en la parte de atrás para que entre aire. Y cuando tú no--cuando básicamente estás llenando la botella, deberás taponarla con algún tipo de tapón de goma.

Y pues tomamos la tapa y básicamente podemos usar la tapa para hacer un sellado hermético para colocar la uretra. Entonces se puede apretar una tapa de rosca así después de poner el agua y así puedes realizar tu experimento. La parte más difícil de hacer estas botellas son los sellados. Pues tenemos esta pistola de pegamento caliente no más que usamos para pegar este tubo de plástico, el cual podemos comprar en la página web de McMaster-Carr y así hacer un sellado hermético.

Por lo que he experimentado, he notado que a los estudiantes les gusta cuando hay cantidades diferentes de fluido. También se pone más dramático así porque se vuelven muy pesadas cuando las sostienen. Y puedes imaginar cuán difícil es esto para el elefante que en realidad está cargando cinco de éstos en su vejiga.

Entonces, hay una porción del segmento del video cuando los estudiantes calculan la ley de Torricelli. Es cuando ellos prueban la ley de Torricelli ellos mismos, y para hacerlo, tienen que usar--pues la ley de Torricelli, si bien recuerdas, provee la correlación entre la velocidad con que fluido sale de un contenedor y la altura del contenedor.

Y la manera más fácil de hacerlo es construir contenedores utilizando uretras reemplazables. Entonces, por ejemplo, esta es una simple botella que se encuentra en una tienda. Abrimos un agujero en la parte de abajo usando un taladro y entonces colocamos un tubo más grande con pegamento caliente, para que podamos básicamente insertar otros tubos dentro de este tubo.

Y entonces puedes visualizar insertar un tubo así de largo, así de largo o más corto. Y si tienes suficientes tubos, el estudiante puede usar todos éstos para producir los datos y apuntarlos. Y creo que es un lindo ejercicio. Les permitirá probar la ley de Torricelli ellos mismos. Con estos aparatos de experimentos, asegúrate de comprar muchos tapones extras.

Siempre se pierden. Pero creo que verás que el tiempo que tarda para preparar este equipo experimental vale mucho la pena. Los estudiantes disfrutarán mucho estos experimentos. Y es uno de los pocos experimentos que puedes hacer que trata de los fluidos y que produce unos números bastante precisos comparados con los que encontrarás en la naturaleza.

Pues gracias otra vez por ver este segmento y por considerar el uso de esta lección. Si tienes más preguntas, por favor consulta la página web donde se encuentra esta lección de BLOSSOMS. Tenemos enlaces donde puedes acceder el trabajo original que fue publicado en *Proceedings of National Academy of Sciences*. Y hay algunos otros videos educativos. Hay un segmento hecho por NPR (la Radio Pública Nacional Estadounidense) que también contiene muchos videos de animales orinando. Gracias otra vez. Nos veremos en la próxima.

(HAY MÚSICA EN EL FONDO)