

LAS EXPERIENCIAS REALIZADAS PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AIRE

por

CORTÉS PLA

Decano de la Facultad de Ciencias Matemáticas

Universidad Nacional del Litoral

Rosario

Hace un tiempo, el Prof. Rey Pastor me solicitó un trabajo sobre la vida y obra de Isaac Newton, destinado a integrar la colección «Ciencia y técnica. — Los clásicos de la ciencia», que dirige en la editorial Espasa-Calpe. Deseoso de documentarme en la forma más amplia con cuanto se vinculara a la trascendencia de las ideas de nuestro autor, me dediqué con entusiasmo durante meses a ordenar mis notas anteriores, ampliándolas con otras recogidas en nuevos estudios.

Así, pues, leí el «Journal du voyage fait par ordre du Roi à l'Equateur servant d'introduction historique a la mesure des trois premiers degrés du méridien» de Carlos María de La Condamine. Me atrajo la descripción de las experiencias que realizó en Quito (Ecuador) para determinar la velocidad del sonido en el aire, sobre todo por el valor obtenido. Efectué las correcciones correspondientes comprobando que su resultado acusaba notable aproximación con el actualmente aceptado.

En efecto, la realizada el 26 de octubre de 1740 entre Quito y Goapoulo, mediante disparos de cañón de 9 libras de bala y estando los observadores — La Condamine y Bouguer — a una distancia de 10.540 toesas (20.542,46 m), proporcionó como velocidad del sonido, 174 toesas por segundo, equivalente a 338,13 m/s, tomando como equivalente de la toesa el valor deducido por Benoit en sus experiencias de 1887 y 1890 comparándola con los patrones del Bureau International, o sea: 1,9490 m⁽¹⁾.

(¹) Véase Ch. E. GUILLAUME, *La convention du mètre*.

La Condamine, como todos los experimentadores anteriores a él, no tuvo en cuenta la temperatura. Felizmente estamos en condiciones de determinar aproximadamente el valor a 0° , ya que en su plan de experiencias estuvo el registrarla continuamente.

Nos dice: «Le thermomètre de M. de Reaumur y marque communément 14 à 15 degrés au dessus du terme de la glace, comme à Paris dans les beaux jours de printemps, et il ne varie que fort peu» ⁽²⁾. Este pasaje — debido a la cantidad de observaciones registradas por los expedicionarios — justifica que se intente la reducción a $0^{\circ}C$. Aplicando la fórmula clásica se obtiene 327,10 m/s si se adopta $14^{\circ}R$ ($17,5^{\circ}C$) o 327,80 m/s si admitimos $15^{\circ}R$ ($18,75^{\circ}C$).

Si en lugar de operar con los datos de La Condamine tomamos el promedio de tres años de las temperaturas registradas por el Observatorio de Quito en el mes de octubre, que es de $13,56^{\circ}$ obtendríamos $V_0 = 330,04$ m/s. Las observaciones de Humboldt (1802), Boussingault (1831), Stübel y Reiss (1870-4), etc., dan valores comprendidos entre los dos precedentes.

Si recordamos además que el valor admitido actualmente oscila entre 330,5 m/s y 331,5 m/s ⁽³⁾ a $0^{\circ}C$, aire seco y presión normal, se obtiene una noción clara del cuidado puesto por La Condamine y Bouguer en la realización de su experiencia.

De las precedentes, únicamente tiene un grado de exactitud semejante, la realizada en 1738 por la comisión de la Academia de Ciencias de París integrada por Cassini de Thury, Lacaille y Maraldi ⁽⁴⁾. Todos los valores anteriores superan bastante la cifra dada por La Condamine, quien no tuvo conocimiento de la experiencia de la Academia ya que partió el 16 de mayo de 1735 de Francia para realizar las medidas del arco de meridiano que le había encomendado la Academia con el fin de determinar la

⁽²⁾ Pág. 49 de la edición de 1751.

⁽³⁾ Ver E. PERUCCA, *Fisica generale e sperimentale*, vol. Primo, pág. 517, 1937.

Kukkamaki da como resultado de sus experiencias 330,77 m/s. con un error probable de $\pm 0,064$ m/s. (Ann. Physik. 1938, 31, 398-406).

⁽⁴⁾ El Prof. BEPPO LEVI después de leer este trabajo, me ha sugerido que sería interesante indagar la razón del porqué estas determinaciones y las de La Condamine acusan respecto a las precedentes como a las que le siguen durante ese siglo, la notable característica de ser las únicas en las que los resultados se aproximan tanto a los aceptados hoy.

forma de la tierra y dilucidar así la polémica existente entre los académicos franceses y los partidarios de la teoría newtoniana.

Sin embargo, es raro encontrar en los textos ni tan siquiera mencionada la determinación del inquieto La Condamine, aún cuando frecuentemente se citen otras cuyo grado de exactitud es bastante menos aceptable. Véanse, para ratificar este aserto, los tratados de Chwolson, Murani, Castelfranchi, Lafay, Fabry, Lemoine et Blanc, Loyarte, Turpain, Chappuis et Berget, Battelli y Cardani, Watson, etc.

Resultado de nuestras búsquedas de las experiencias realizadas hasta ahora para determinar la velocidad del sonido en el aire, siguiendo el método de los cañonazos, es el cuadro que acompaña este trabajo. Su lectura indica en forma sintética la evolución de las ideas al respecto, ya que paulatinamente se van considerando nuevos factores y se logra mayor concordancia y precisión en los resultados.

Debemos dejar constancia de algunas observaciones. En primer término, digamos que no han sido incluídas las experiencias de Kästner (1778), quien por primera vez utilizó un reloj para medir el tiempo; de J. T. Mayer (1778) y G. E. Muller (1791). por cuanto no hemos podido encontrar las memorias que nos brindaran datos seguros.

Cuando nos ha sido posible, hemos efectuado la corrección a 0°C, humedad y presión, haciendo uso de las fórmulas clásicas.

Se notará que en las de Bianconi no se consigna el resultado obtenido. Bianconi no se proponía cotejar sus cifras con las de los experimentadores anteriores. Pensaba — y con razón — que la velocidad debía depender de la temperatura, factor absolutamente dejado al margen por todos sus antecesores. Decide entonces realizar dos determinaciones: una en verano y otra en invierno para dilucidar la duda que se le ha planteado. El 18 de agosto de 1740, verano para Bolonia donde efectúa su experiencia, establece las estaciones de los observadores a una «distancia de trece y más de nuestras millas»⁽⁵⁾ deduciendo que el sonido emplea 76 segundos en recorrerlas⁽⁶⁾. El barómetro marcaba una altura de 28 dedos y una línea y la temperatura

⁽⁵⁾ BIANCONI, *Della diversa velocità del suono* en "Due lettere di Fisica al Signor Marchese Scipione Maffei", Venezia, 1746, pág. LXXXIII.

⁽⁶⁾ *Ibid.*, pág. LXXXV.

era de $20^{\circ}R$ ⁽⁷⁾. Repite la experiencia en invierno, durante la noche del 6 de febrero de 1741, obteniendo un tiempo de $78\frac{1}{2}$ segundos ⁽⁸⁾ en las cuatro determinaciones realizadas. La influencia de la temperatura era, pues, manifiesta.

La imprecisión de la distancia consignada nos impide calcular el valor obtenido para la velocidad.

Digamos también que Bianconi estudió la influencia de la niebla en la propagación del sonido, llegando a la conclusión de que era enteramente despreciable.

Finalmente debemos dejar constancia de que los datos citados son textualmente los que el autor expone en su memoria. La divergencia que acusan con los dados por Poggendorff en su nombrada «Histoire de la Physique» (y tan repetidos), revelan que el prestigioso historiador no ha tenido en su poder la memoria original. Sólo así puede explicarse la total inexactitud del texto de Poggendorff.

La naturaleza y destino de este trabajo nos impide extendernos en detalles acerca de todas las experiencias hechas para determinar la velocidad del sonido en el aire, mediante el procedimiento de los cañonazos, lo que haremos en otra oportunidad y cuando logremos los datos que aún nos faltan. Nuestro propósito es ahora el de anticipar el cuadro adjunto y, especialmente, destacar la experiencia de La Condamine.

Experiencia de un europeo en tierra americana. Quizá por eso mismo, olvidada y no valorada. Exhumarla y querer adjudicarle la jerarquía que posee, y más todavía en comparación con otras realizadas con mejores elementos, nos ha parecido tema adecuado para este volumen de homenaje a otro europeo que en tierra americana sembró inquietudes, despertó vocaciones, enseñó ciencia, entregó íntegramente su inteligencia notable, su entusiasmo contagioso y su inagotable energía, para encauzar entre nosotros la matemática, la historia de la ciencia... Europeo que se hizo nuestro por la obra cumplida aquí y que sólo se valora realmente cuando miramos el ayer y, sobre lo actual, prevemos el futuro de la ciencia en nuestro país.

⁽⁷⁾ *Ibid.*, págs. LXXXVII y LXXXVIII.

⁽⁸⁾ *Ibid.*, pág. LXXXIX.

EXPERIENCIAS REALIZADAS PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AIRE LIBRE
(Método de los cañonazos)

	Fecha	Velocidad en m/s.		Nota bibliográfica	Observaciones
		A temperatura de la experiencia	A 0°C		
GASSENDI	—	478,489	—	“Opera omnia” Sect. I, Liber VI - Cap. X: “De Sono”, 1658.	La obra se publicó tres años después de la muerte del autor.
MERSENNE	1636	448,28	—	“Harmonicorum Libri”, - Paris 1636. “Balística”, - Prop. XXXV; 1644.	
ACADEMIA DEL CEMENTO - Florencia.	1656	360,897	—	“Saggi di naturali esperienze fatte nell'Accademia del Cimento”, XI.	Consideran que el viento no tiene influencia en la velocidad del sonido.
BORELLI y VIVIANI	1660	349,852	—	“Tentamina Experimentorum naturalis captorum in Accademia del Cimento”, t. II; p. 116; 1738.	
DOM. CASSINI - PIGARD - HUYGENS y RÖMER	1678?	356,67	—	DUPAMEL: “Histoire de l'Académie Royale des Sciences”, t. 2°.	HUYGENS en “Traité de la lumière” adopta el valor de 350,83 m/s. obtenido en las experiencias que realizó en Viry el 8 de octubre de 1669, basándose en el fenómeno del eco.
R. BOYLE	—	365,769	—	Citado por WOLF.	
ROBERTS	—	396,304	—		
WALKER	1698	407,674	—	“Philosophical Transactions”, 1698.	
DERHAM	1705	348,228	—	“Phil. Trans.” XXVI, N° 313; p. 1; 1708.	Es el primero en poner en evidencia la influencia del viento.
FLAMSTEAD y HALLEY	1707 - 8	348,228	—	“Phil. Trans.”. 1708.	

	Fecha	Velocidad en m/s.		Nota bibliográfica	Observaciones
		A temperatura de la experiencia	A 0°C		
COMISIÓN ACADEMIA CIENCIAS - París (CASSINI DE THURY, LACAILLE Y MARALDI)	1738	337,183 de 5 a 7,5° C	332	CASSINI DE THURY: "Sur la propagation du son", en Histoire de l'Academie Royale des Sciences; año 1738 - Paris, 1740; p. 128 a 146. Ibid.: Año 1739; París 1741 memoria de Cassini de Thury: "Sur les operations geometriques faites en France dans les années 1737 et 1738"; p. 119-134.	No tuvieron en cuenta el grado de humedad de la atmósfera. El valor consignado a 0° C, es a aire seco según el cálculo de Le Roux: "Détermination expérimentale de la vitesse de propagation d'un ébranlement sonore dans un tuyau cilindrique", (Annales de Chimie et Physique; 4e. Serie; 1867; p. 348).
LA CONDAMINE	1740	339,13		"Journal du voyage fait par ordre du Roi à l'Equateur..." Impr. Royale; 1751; p. 98.	Admitiendo que la temperatura fué de 18°75' C. Vo = 327,80 m/s, y para 17°5 C. Vo = 327,10 m/s.
BIANCONI	1740 - 1	--	--	BIANCONI: "Della diversa velocità del suono", en "Due lettere di Fisica al signore Marchese Scipione Maffei", Venezia, 1746 - Es la segunda, ver p. LXXV a CX.	Fué el primero en pensar y luego, probar que la velocidad pudiera depender de la temperatura.
LA CONDAMINE	1741	357,641	--	HIST. AC. ROY. SC, año 1745 - París, 1749 - Memoria titulada: "Relation abrégée d'un voyage fait dans l'intérieur de l'Amérique Méridionale, depuis la Côte de la Mer du Sud, jusques aux Côtes du Brésil et de la Guiane, en descendant la rivière des Amazones", p. 488.	Damos el promedio de 5 experiencias realizadas entre CAYENA y COURU.

	Fecha	Velocidad en m/s.		Nota bibliográfica	Observaciones
		A temperatura de la experiencia	A 0°C		
ESPINOSA Y BAUVA	1794	374 a 23°2 C	359,062	<i>Annales de Chimie et Physique</i> , 2e. Serie; t. VII, p. 93; 1817.	Tomamos como valor a 23°2 el promedio de las experiencias hechas en <i>Santiago de Chile</i> , de acuerdo a los datos de los autores consignados en p. 98. La corrección a 0°C no es a aire seco.
BENZERBERG	1809	335,20 a 1°9 C	333,7	"Über die Geschwindigkeit des Schalls bey hohen Temperaturen"; GILBERT'S, <i>Annalen der Physik</i> ; t. XLIII, p. 1; 1812.	No consignamos sus experiencias del 5 de noviembre de 1809 (GILBERT'S, <i>Ann. der Phys.</i> ; XXXV, p. 383, 1810) por cuanto a raíz de las críticas de Gilbert (<i>Ann. der Phys.</i> ; XXXV; p. 383; 1810), BENZERBERG repitió sus experiencias obteniendo los valores que damos aquí.
	1811	350,78 a 28°4 C	332,33		
GOLDINGHAM	1820 - 21	347,57 a 27°5 C	331,10	POGENDORFF'S, <i>Annalen der Physik</i> ; t. V; p. 486. <i>Phil. Trans.</i> p. 96, 1823.	
PARRY - NYAS Y FISCHER	1821 a 1823	326,1 a 0°7 C 300,5 a 40°7 C	326,52 325,74	"Appendix to captain Parry's Journal of a second voyage for the discovery of the north-west passage in the years 1821, 1822 y 1823".	Primera determinación en regiones polares. Promedio de 18 experiencias.
	1822	340,89 a 15°9 C	330,64		
Bureau des Longitudes - Paris (ARAGO - GAY LUS- SAC - BOUYARD- PRONY - HUM- BOLDT Y MA- THEU).				ARAGO: "Resultats des expériences faites par ordre du Bureau des Longitudes pour la détermination de la vitesse du son dans l'atmosphère". <i>Commissance des Temps</i> , 1825, p. 361, y <i>Ann. Chimie et Physique</i> , 2e. Serie; t. XX; p. 210-23.	Estas experiencias tendían no sólo a extremar las posibilidades de obtener un valor más exacto, sino también a verificar experimentalmente la fórmula teórica de la velocidad dada por LAPLACE. Los valores son los calculados por LE ROUX, <i>Ann. Ch. et Phys.</i> , 4e. Serie, t. XII, 1807, p. 351.

	Fecha	Velocidad en m/s.		Nota bibliográfica	Observaciones
		A temperatura de la experiencia	A 0°C		
STAMPFER Y DE MYRBACH	1822	—	332,96	<i>Versuche von Stampfer und Myrbach: "Poggendorff's Annalen der Physik"; t. V; p. 496; y "Jahrbuch des Wiener polytechnischen Instituts", t. VII, p. 23.</i>	Diferencia de nivel entre las dos estaciones de observación: 1364 m. (MOENCHSTEIN y UNTERBERG en Austria).
MOLL Y VAN BEEK	1823	—	332,25	<i>Versuche über die Geschwindigkeit des Schalls gemacht in Holland: Pogg. Ann. der Phys.; t. V; p. 351 y 469. Phil. Trans.; 1824; p. 424.</i>	Cuidadosas experiencias donde se tuvo en cuenta no sólo la temperatura, sino también la presión y el estado higrométrico de la atmósfera y reciprocidad de los disparos. Promedio de 36 observaciones.
O. GREGORY	1824	337,56 a 792 C	333,2	<i>"An account of some experiments made in order to determine the velocity with which the sound is transmitted in the atmosphere"; Philosophical Magazine; LXIII; p. 401; 1824.</i>	El autor sostiene que a 10° C, V = 337m, 867 y que para tener la velocidad a 0°, bastará sumar o restar 0m 313 por cada grado encima o debajo de cero. Según eso la velocidad a 0° sería de 334,73m. El objeto principal de sus experiencias era determinar la influencia del viento.
PARRY Y FOSTER	1824	309,2 a — 38°5 C	333,62	<i>"Journal of a third voyage for the discovery of a north-west passage in the years 1824-1825"; Experiments to determine the rate at which sound travels at various temperatures and pressures of the atmosphere; Appendix, p. 86.</i>	Observaciones realizadas en Puer to Bowen.

	Fecha	Velocidad en m/s.		Nota bibliográfica	Observaciones
		A temperatura de la experiencia	A 0°C		
KENDALL	1825	331,2 a — 25° C — 313,9 a — 40° C	332,73 339,75	J. FRANKLIN: "Narrative of a second expedition to the shores of the polar sea". Appendix IV: Observations on the velocity of sound at different temperatures.	Experiencias hechas en el Gran Lago de los Osos - Canadá - entre 65° y 67° de latitud.
BRAVAIS Y MARTINS	1844	338,01 a 8917	332,37	"De la vitesse du son entre deux stations également ou inégalement élevés au-dessus du niveau de la mer"; Ann. de Ch. et Phys.; 3e. Serie; t. 13; 1845.	El valor transcritto es el promedio de las observaciones hechas, reducidas a 0° C y aire seco, dado por los autores (p. 23). El fin perseguido era estudiar la velocidad del sonido a diferentes alturas, siguiendo la idea de Stampfer y de Myrbach, pero con mayor diferencia de nivel. Las estaciones de observación estaban aquí a 2079 m. de diferencia.
REGENAULT	1864	339,7	330,7	"Relation des expériences entreprises par ordre du Ministre des Travaux Publics pour déterminer les principales lois et les données physiques nécessaires au calcul de la machine à vapeur".	Promedio de 167 observaciones. Obtuvo en otra serie de experiencias 331,37 m/s. a 0° C, aire seco y calmo.
SZATHMAIR	1877	—	331,57		
FROT	1896	—	330,7	Comptes Rendus Acad. Sc. Paris, t. 127; 1898; p. 609 a 611.	El valor que damos es el calculado por el autor como promedio de sus experiencias.

	Fecha	Velocidad en m/s.		Nota bibliográfica	Observaciones
		A temperatura de la experiencia	A 0°C		
AUGERER Y LADENBURG	1916-18		330,8	Ann. der Phys.; t. 66; p. 293; 1921.	Experiencias realizadas durante la guerra de 1914-18 y en distancias hasta de 11 km.
ESCLANGON Y FOEX	1917-8	339,9 a 15° C	330,9	“ <i>Sur une nouvelle détermination de la vitesse du son à l'air libre</i> ”; Compt. Rend. Ac. Sc. Paris, t. 168; p. 165-7; 1919.	“La moyenne générale déduite de l'ensemble des deux groupes (vents forts el vents modérés) donne 339,8, mais en raison, des forts écarts qui comporte le premier groupe, nous considérons comme plus exacte le nombre déduit du second groupe” (p. 167) que es el adoptado aquí. Estas determinaciones se realizaron durante la guerra de 1914, desde junio de 1917 a marzo 1918.
MILLER	1919	—	331,36	Ver la columna siguiente.	Distancia: 6,19 km. Cañones de 20 cm. y 30,5 cm. Datos tomados de DAYTON CLARENCE MILLER: “ <i>Sound Waves Their Shape and Speed</i> ”, New York - The Mac Millan Co, 1937.
KUKKAMAKI	1938	—	330,77	Ann. Phys.; t. 31; p. 398-406; 1938.	Valor corregido a 0° C, aire seco y presión atmosférica. El autor afirma que el error puede ser de $\pm 0,064$ m/s. De sus experiencias deduce una relación entre la velocidad y la frecuencia.

Hemos tomado como valor de 1 pie de París, 0,30484 m; 1 pie inglés igual a 0,3048 m. y la toesa equivalente a 1,949 m.