

Trabajo presentado a la REF XVII de la
Asociación de Profesores de Física de la Argentina.
Villa Giardino, septiembre 2011
Versión 3 de julio de 2011

Potencia de la erupción del volcán Puyehue como un problema de Fermi

Hernán Asorey, Arturo López Dávalos
UNRN, CNEA, CONICET

y

Andrea Clúa

Alumna Profesorado en Física, UNRN

Introducción

El reconocido físico italiano Enrico Fermi (Ref 1,2) era famoso por su maestría para realizar cálculos aproximados que daban información confiable, a partir de algunos datos que para otros podían resultar insuficientes. Uno de los ejemplos más conocidos de esta habilidad es la estimación que hizo de la potencia de la primera bomba atómica detonada en Los Álamos, midiendo la distancia recorrida por unos recortes de papel que dejó caer mientras participaba como observador de esa explosión (Ref 3).

Tiempo después, cuando se desempeñaba como profesor en la Universidad de Chicago, Fermi solía plantear ese tipo de problemas a sus alumnos, como un método de enseñanza. El más conocido consistía en estimar cuántos afinadores de piano había en la ciudad de Chicago, en esa época. Planteando una serie de hipótesis razonables, tales como el número de personas que viven en Chicago, cuántas personas viven en promedio en cada casa, cada cuántas casas hay un piano, con qué frecuencia debe afinarse un piano, cuánto tiempo le lleva a un afinador hacer su trabajo, etc., hizo una estimación del número de afinadores de piano de Chicago, obteniendo un resultado que se comparaba razonablemente bien con los que figuraban en la guía de teléfonos.

En el primer curso de física de la carrera de Profesorado de la UNRN frecuentemente se plantea a los alumnos problemas de la vida diaria, que a veces pueden resolverse "à la Fermi". Pensamos que éste es un método que ayuda a agudizar la imaginación y la capacidad de observación, a la par que resulta un entrenamiento en el razonamiento lógico.

Dentro de ese tipo de problemas planteamos recientemente la posibilidad de estimar la potencia desarrollada por el volcán Puyehue-Cordón Caulle en su erupción del 4 de junio de 2011. Para ello consideramos solamente la primera erupción, que cubrió con cenizas y arena a San Carlos de Bariloche, Villa La Angostura y alrededores.

Hipótesis de trabajo

Las hipótesis de trabajo que utilizamos para estimar la potencia desarrollada por el volcán Puyehue en su erupción del 4 de junio son las siguientes:

1) Área cubierta por arena y cenizas: De acuerdo a las fotografías tomadas por el satélite Terra de la NASA el día 5 de Junio de 2011, a las 13,45 h difundidas por Internet, y debido a las condiciones del viento de ese día, la nube de arena y ceniza siguió prácticamente una línea recta que corre a lo largo del lago Nahuel Huapi, en dirección oeste-noroeste hacia el sur-sureste. A pesar de que sobre el agua no eran visibles, es claro que las cenizas cubrieron toda el área A_{NH} del lago. Por ello usamos esa superficie como base para estimar la cantidad de ceniza caída y suponemos que el área cubierta por las cenizas y arena equivale aproximadamente a tres veces el área del lago Nahuel Huapi.

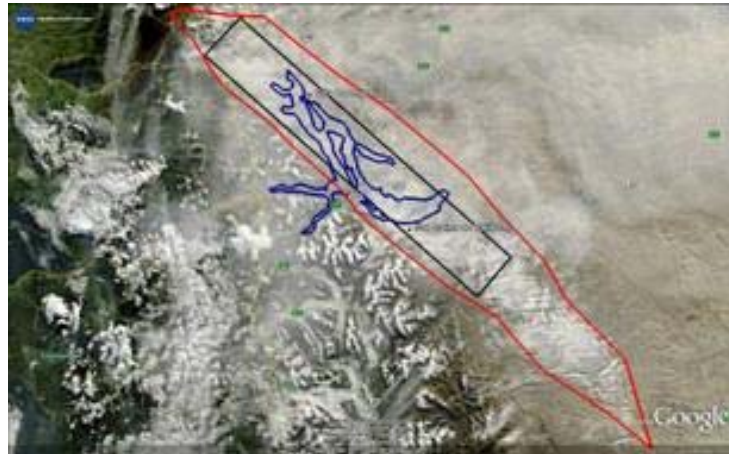


Figura 1. Foto del satélite Terra del día 5/06/2011.

La Figura 1 muestra una fotografía satelital correspondiente a las 13.45h del día siguiente a la erupción (Ref 4). El contorno rojo encierra el área cubierta con ceniza y arena; el perfil azul corresponde al contorno del lago Nahuel Huapi y el rectángulo negro marca un área igual a tres veces la superficie del lago, que tomamos como área de referencia. La superficie del espejo de agua es 529 km^2 y si le adicionamos las superficies de las islas más grandes, Victoria y Huemul que suman 32 km^2 tenemos para el área base $A_{NH} = 571 \text{ km}^2$. El área de referencia es entonces de $3 \times 571 \text{ km}^2 = 1713 \text{ km}^2 = 1.713 \times 10^9 \text{ m}^2$.

2) Espesor de la capa de arena: En coincidencia con la hipótesis anterior sobre el área de referencia, asignamos un valor al espesor promedio de la capa de arena y cenizas. Se sabe que en Villa Angostura esa capa alcanzó más de treinta centímetros mientras que al este de Bariloche no llegaba a 10cm. Por otra parte los informes desde Ingeniero Jacobacci indicaban allí una acumulación de más de 10cm el día 5 de junio. Esto corresponde a ceniza y arena que no cayó en la zona del lago Nahuel Huapi pero que debe ser incluida en el cómputo pues su ascenso afecta el balance energético del volcán. Para incluir la contribución de todo el material despedido tomamos una altura promedio de $e = 10 \text{ cm}$, cubriendo el área de referencia.

3) Duración de la actividad eruptiva: La caída de cenizas en Bariloche comenzó a la 16.30h y finalizó a las 21,30h por lo que tomamos un tiempo de actividad volcánica $T = 5 \text{ h}$.

4) Altura alcanzada por la nube. La altura que interesa es la diferencia

$\Delta h = h - h_0$ donde $h_0 = 2000\text{m}$ es la altura de la boca del volcán. Hemos tomado $\Delta h = 5000\text{m}$, un valor promedio ya que distintas componentes de la columna alcanzaron distintas alturas, las más livianas llegaron a 12000m .

5) Densidad de la mezcla de arena y cenizas: La densidad de la arena y ceniza caída en Bariloche fue determinada utilizando elementos de uso doméstico: una jarra medidora de las usadas para medir harina o azúcar y una balanza. El resultado fue $\rho = 600\text{kg/m}^3$. Este valor, menor que la densidad del agua, se explica por el contenido de ceniza y piedra pómez -que flota en el agua- mezclado con componentes más densas que tienden a hundirse en el agua.

Resultados

Volumen total de la arena caída

$$V = A \times e = 3 \times 5.71 \times 10^8 \text{m}^2 \times 0.1\text{m} = 1.7 \times 10^8 \text{m}^3$$

Considerando que un camión de transporte de áridos puede cargar unos 7m^3 , la arena caída equivale a

$$\frac{V_{\text{arena}}}{V_{\text{camión}}} = \frac{1.713 \times 10^8 \text{m}^3}{7\text{m}^3} = 2.451 \times 10^7 \text{camiones} \quad \#$$

esto es, más de veinticuatro millones de camiones. Otra manera de visualizar la cantidad de arena consiste en calcular la altura que alcanzaría si se depositara en una superficie cuadrada de lado L apilándola en forma de pirámide de altura H . El volumen de la pirámide $V = \frac{A_b \times H}{3} = \frac{L^2 \times H}{3} = \frac{1}{6} L^3 \tan \alpha$, debe coincidir con el volumen calculado. Sin embargo, como el ángulo de inclinación de la pirámide no debe superar el "ángulo de talud" de la arena que es de aproximadamente (Ref. 5) 40° , existe un vínculo entre la altura H y la base L . Tenemos las relaciones

$$L = \sqrt[3]{\frac{6V}{\tan \alpha}} \quad \#$$

$$H = \frac{L}{2} \tan \alpha$$

con $\tan \alpha = 0.8391$

Calculando para el volumen de arena y cenizas dado más arriba se obtiene

$$L = 1070\text{m} \quad \#$$

$$H = 449\text{m}$$

Dicho de otra forma, la arena caída se podría acumular en un terreno de 1km de lado, formando una pirámide de 450m de altura. Como referencia visual podemos decir que la superficie del emergente visible de la Isla Huemul es de unas 90ha ($\approx 0.9\text{km}^2$), y su altura bastante menor que los 450m que obtuvimos aquí.

Masa de la arena y cenizas caídas

Para determinar la masa de arena caída, multiplicamos el volumen calculado por la densidad medida, y obtenemos la cantidad

$$\begin{aligned}
 m_{arena} &= V_{arena} \times \rho = 1.713 \times 10^8 m^3 \times 6 \times 10^2 \frac{kg}{m^3} \\
 &= 1.03 \times 10^{11} kg \\
 &= 103Mt
 \end{aligned}$$

es decir alrededor de 100 millones de toneladas.

Energía liberada

La energía necesaria para elevar esa masa de arena a 5000m se puede estimar a partir de la energía potencial que alcanza cuando llega a su altura máxima,

$$E = mgh \quad \#$$

Luego tenemos

$$\begin{aligned}
 E_{Puyehue} &= mg\Delta h = \\
 &= 1.03 \times 10^{11} kg \times 9.8 \frac{m}{s^2} \times 5000m \\
 &= 5.04 \times 10^{15} J = 1.2 \times 10^3 kt
 \end{aligned}$$

es decir, más de mil kilotones.

Equivalente en bombas atómicas

Esta energía se puede comparar con la energía liberada por la bomba atómica de Hiroshima (Ref. 6),

$$E_H = 75TJ = 75 \times 10^{12} J = 18kt. \quad \#$$

La razón entre ambas cantidades es

$$\frac{E_{Puyehue}}{E_H} = \frac{5.0362 \times 10^{15} J}{75 \times 10^{12} J} = 67.15 \quad \#$$

En conclusión, el primer día de erupción el Volcán Puyehue liberó una energía equivalente a unas 70 bombas atómicas como la de Hiroshima. A manera de comparación podemos mencionar que el terremoto de Japón de 2011, de una magnitud de 8,9 grados en la escala de Richter, liberó una energía equivalente a 10000 bombas de Hiroshima.

Velocidad de salida

El magma asciende por el conducto del volcán mezclado con los vapores de la roca fundida y vapor de agua, lo que determina un flujo turbulento de dos fases. La velocidad de salida del magma por el cráter se puede estimar a partir de la ley de conservación de la energía ya que el flujo ascendente, al menos para los componentes más densos, es balístico. Los elementos que alcanzan las máximas alturas reportadas seguramente ascienden el último tramo por convección. Por esa razón tomamos 5000m para la altura alcanzada, un valor menor que los 10000m ó 12000m reportados. Despreciando el rozamiento con el aire, la energía cinética del fluido en la boca del cráter debe ser igual a la energía potencial alcanzada en el ascenso final,

$$\frac{1}{2}mv^2 = mg\Delta h \quad \#$$

De aquí sigue que

$$v = \sqrt{2g\Delta h} = \sqrt{2 \times 9.8 \frac{m}{s^2} \times 5000m} = 313 \frac{m}{s}, \quad \#$$

esto es, casi la velocidad del sonido en el aire. Esta elevada velocidad determina el rápido enfriamiento del magma saliente, lo que explica la estructura amorfa y la presencia de microcristales en el material expulsado, ante la imposibilidad de una cristalización lenta que produciría cristales más grandes.

Potencia

Si suponemos que la primera erupción duró unas 5 horas, podemos estimar la potencia desarrollada por el volcán, que está dada por

$$P_{Puyehue} = \frac{E_{Puyehue}}{T} = \frac{5.04 \times 10^{15} J}{1.8 \times 10^4 s} = 2.8 \times 10^{11} W \quad \#$$

Podemos comparar este resultado con la potencia eléctrica instalada en la Argentina, que es de (Ref. 7)

$$P_{Arg} = 26000 MW. \quad \#$$

Luego la proporción es

$$\frac{P_{Puyehue}}{P_{Arg}} = \frac{2.8 \times 10^{11}}{23371 \times 10^6} = 12 \quad \#$$

La potencia desarrollada por el volcán equivale a 12 veces la potencia eléctrica instalada en la Argentina. También podemos comparar nuestro resultado con la potencia eléctrica instalada mundial (Ref. 8), que es de

$$P = 15 TW = 1.5 \times 10^{13} W \quad \#$$

Una comparación porcentual resulta en

$$\frac{P_{Puy}}{P_{Mund}} = \frac{2.8 \times 10^{11}}{1.5 \times 10^{13}} \times 100 = 1.9\% \quad \#$$

La potencia desarrollada por el volcán Puyehue equivale a cerca del 2% de la potencia eléctrica mundial.

Comentarios sobre las hipótesis

En el problema de los afinadores de piano, Fermi podía comparar el resultado obtenido, 70 afinadores, con lo que resultaba de una consulta a la guía de teléfonos, 50 afinadores. La discrepancia podría atribuirse al hecho de que algunos afinadores no tuvieran teléfono o no figuraban como tales en la guía, o también a un error en la estimación. Pero este último punto es parte del juego: no se pretende obtener un resultado exacto, sino que sólo se aspira a lograr una aproximación razonable. Entendemos como tal una discrepancia que no supere cierto límite, digamos el 100%.

A continuación haremos un comentario sobre cada una de las hipótesis que utilizamos:

1) **Área cubierta:** En la erupción del 4 de Junio de 2011 la ceniza y arena

cubrieron un área más extensa que la supuesta en este trabajo. Eso significaría que nuestra estimación de la energía y la potencia es una subestimación del verdadero valor. El espesor uniforme que suponemos en la zona considerada intenta compensar por el material caído más allá de la zona considerada, pero puede no ser suficiente.

2) Espesor promedio de la capa de arena y ceniza. Se sabe que en la proximidades del volcán, Paso Cardenal Samoré y Villa La Angostura la capa de arena y cenizas alcanzó los 40cm, mientras que más hacia el este no superó los 5cm. Como se trata de una estimación promedio, consideramos que la cifra de 10 cm es acertada. La arena caída tiene espesores que van desde los 40 cm en algunos lugares a 5cm o menos en otros. El espesor hipotético (10cm) está elegido pensando que si lo caído en distintos lugares se distribuyera de manera uniforme cubriendo un área igual a tres veces el Nahuel (más de 1700km²) se alcanzaría ese valor.

3) Tiempo estimado de actividad. La caída de arena y cenizas en Bariloche cesó a las 21,30 h aproximadamente, es decir que la primera erupción duró cinco horas. Los truenos provocados por las descargas eléctricas duraron un total aproximado de 12h indicando que la actividad del volcán continuaba hasta entonces. Esto no afecta la estimación de la energía desarrollada en las primeras cinco horas.

4) Altura alcanzada por la nube: los informes del día 4 de junio indicaban una altura de la pluma (plume) de 12000 metros snm. Como esa pluma comprendía componentes de distinta densidad, creemos que nuestra suposición de $\Delta h = 5000\text{m}$ es razonable para su uso en estas estimaciones. Sin embargo, si quisiéramos hacer una estimación más conservativa, podemos tomar una altura bastante menor, por ejemplo 2500m. Como tanto la energía como la potencia calculadas dependen linealmente de la altura, podríamos tomar los valores como obtenidos como una cota inferior de nuestra estimación.

5) Densidad de la mezcla de arena y cenizas: la medición se hizo con una muestra recogida a pocas horas del inicio de la erupción. Muestras tomadas algunos días después dan valores de densidad más elevados, posiblemente debido a que la lluvia disolvió o arrastró parte de esos componentes.

6) Velocidad de salida: No tenemos conocimiento de que se hayan realizado mediciones de la velocidad de salida del magma en la erupción del 4 de junio en este volcán, pero autores especializados han estudiado el flujo supersónico del magma en algunos volcanes una situación típica de las llamadas erupciones piroclásticas explosivas (Ref 9,10) como la del volcán Puyehue-Cordón Caulle del día 4 de junio de 2011 (Ref 11).

Conclusión

La solución del problema planteado indica que con los conocimientos al alcance de los alumnos de la escuela media, e introduciendo una sucesión de hipótesis razonables, es posible resolver de manera aproximada un problema surgido de un evento natural y que afecta nuestra vida diaria.

Por otra parte una comparación de las cantidades calculadas con las energías

vinculadas a actividades humanas muestra la magnitud de la energía puesta en juego en los fenómenos geológicos.

Para obtener información más precisa sobre la erupción recomendamos leer los informes de los Dres. Adriana Bermúdez y Daniel Delpino en las referencias 12) y 13).

Agradecimientos

Agradecemos los valiosos aportes y sugerencias realizadas por colegas de la UNRN y del CAB-IB así como el intercambio de correspondencia con Adriana Bermúdez y Daniel Delpino (ambos de UNCOMA-CONICET).

Referencias

1) Laura Fermi, *Átomos en mi familia (Mi vida con Enrico Fermi)*, Editorial Marfil, Alcoy, España, 1956.

2) Emilio Segrè, *Enrico Fermi, Physicist*, University of Chicago Press, Chicago, 1970.

3) Robert Jungk, *Más brillante que mil soles*, Editorial Argos Vergara, Madrid, 1959.

4)

<http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/subsets/?subset=Patagonia.2011165.terra.1km>

5) http://en.wikipedia.org/wiki/Angle_of_repose

6) http://en.wikipedia.org/wiki/Little_Boy

7) http://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_el%C3%A9ctrica_en_Argentina

8) http://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_consumption

9) Andrew W. Woods and Sally M. Bower, *The decompression of volcanic jets in a crater during explosive volcanic eruptions*, Earth and Planetary Science Letters, Volume 131,

Issues 3-4, April 1995, Pages 189-205.

10) Karl L. Mitchell, Volcanic Eruption Mechanisms, *Coupled conduit flow and shape in explosive volcanic eruptions*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume

143, Issues 1-3, 1May 2005, Pages 187-203

11) Una erupción de este tipo del volcán Vesubio en el año 79 dC provocó la trágica desaparición de la ciudad de Pompeya. Los habitantes fueron sorprendidos en sus tareas cotidianas por la nube de cenizas que se desplazaba a alta velocidad y que rápidamente cubrió todo, no dándoles tiempo a huir. La lava que llegó inmeditamente después mantuvo esa situación hasta el año 1748, en que comenzaron las excavaciones arqueológicas de recuperación.

12) Adriana Bermúdez y Daniel Delpino, Primer informe

<http://www.conicet.gov.ar/webfiles/2011/06/Impacto%20de%20la%20actividad%20del>

13) Adriana Bermúdez y Daniel Delpino, Segundo informe