

## La XXIII Olimpiada de Ciencias de la Tierra: Erupciones volcánicas

Loïc Peiffer, Rebeca López Montes

División de Ciencias de la Tierra, CICESE, Ensenada, Baja California, México.

peiffer@cicese.mx

### Presentación

Para esta nueva edición de las olimpiadas, la División de Ciencias de la Tierra de CICESE eligió como tema “Erupciones volcánicas”. El presente documento guiará a los estudiantes en su investigación sobre la temática en cuestión, sirviéndoles de apoyo en su preparación para el día de la competencia. La edición 2018 de la olimpiada, cuenta con 25 preguntas nuevas inspiradas en esta guía, mientras que las 75 preguntas restantes, serán extraídas de las tres ediciones pasadas organizadas del 2015 al 2017, cuyos temas fueron en orden cronológico: “Geotermia y la Teoría de la Tierra Bola de Nieve”, “Energía” y “El Cosmos y Nuestro Planeta”. Estas 75 preguntas las pueden consultar en los informes disponibles en la página: <http://olimpiadas.ugm.org.mx>. Las 25 preguntas nuevas tendrán un valor total de 75 puntos (3 puntos cada una), mientras que las 75 preguntas pasadas valdrán 25 puntos (1/3 de punto c/u). Para quienes no han asistido a nuestras olimpiadas, se les recomienda ver el siguiente video en YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=Ps1xh3QgcvY>.

En la XXIII Olimpiada participaron escuelas preparatorias provenientes de los cinco municipios del estado: Mexicali, Tecate, Tijuana, Rosarito y Ensenada. Gilberto Daniel Partida Coria, estudiante de la Preparatoria Xochicalco Campus Mexicali, ganó el primer lugar; su asesor fue el profesor Pedro Castro Olivas. Por su parte, Eduardo Magaña Torres, asesorado por el profesor Guillermo Martínez García, del Cecyte de Ensenada, obtuvo el segundo lugar. Alondra Valdez García del COBACH Rosarito, de Playas de Rosarito, con la asesoría del profesor José Artemio Cazarez Ibarra logró el tercer lugar. Los ganadores recibieron su constancia respectiva así como premios en efectivo de 2,500 pesos para el primer lugar, 2,000 para el segundo y 1,500 para el tercero. Todos los participantes del concurso obtuvieron una constancia de participación

**Erupciones volcánicas: Guía para la XXIII Olimpiada de Ciencias de la Tierra para estudiantes de preparatoria de Baja California. Viernes 22 de junio de 2018 en el auditorio institucional del CICESE, Ensenada, Baja California.**

### Introducción

Los volcanes fascinan y asustan a la vez. Fascinan por su belleza natural, por su fuerza pura y por hacernos recordar los tiempos más primitivos de la Tierra, cuando el hombre aún no imprimía su huella en cada rincón del planeta, con grandes

ciudades y carreteras. Son aterradores cuando entran en erupción y llegan a aniquilar todo a su alrededor en cuestión de (a veces) tan solo unos minutos. A través de esta guía, te vamos a llevar a investigar ciertos mecanismos fisicoquímicos que desencadenan la furia de un volcán; también te vamos a explicar lo que es un sistema hidrotermal, cómo funciona un geiser y cómo monitorear la actividad de un volcán a partir de la composición química de sus manantiales termales. Reflexionarás sobre la cantidad de energía liberada por las más grandes erupciones volcánicas y sus consecuencias. Finalmente, te contaremos algunas anécdotas sobre algunos volcanes del mundo y de México.

## Magma, gases, burbujas y erupción

El magma se define como una masa de rocas fundidas que se forma a decenas de kilómetros de la superficie, dentro del manto superior o en la base de la corteza terrestre. Esta masa fundida es menos densa que la roca que no se fundió (residuo sólido), lo que le permite ascender hasta profundidades más someras por un efecto de “flotabilidad”, el cual viene establecido por el principio de Arquímedes. Si el magma llega a encontrar una salida hacia la superficie, se generará una erupción volcánica. La dinámica de las erupciones volcánicas está muy estrechamente ligada a la concentración de gases contenidos en el magma. Si un magma no contiene gases o contiene muy pocos, el estilo de erupción será de tipo “efusivo”. Se reconoce en superficie por la emisión de flujos de lava o domos de lava. Al contrario, cuando el magma tiene un alto contenido en gases, la erupción se vuelve explosiva. El término explosivo se refiere a que el magma se fragmenta (se parte en pedacitos) y es eyectado por la fuerza de los gases. Este tipo de erupciones se pueden manifestar de varias maneras, como son las fuentes de lava, las columnas eruptivas constituidas de cenizas, bloques y gases ardientes, así como los flujos piroclásticos. Te sugerimos profundizar tu conocimiento sobre estos diferentes tipos de manifestaciones eruptivas. ¿Conoces ejemplos de volcanes cuya actividad eruptiva es principalmente efusiva o explosiva? Revisa también el principio de Arquímedes.

De los gases principales que emite un magma, el vapor de agua ( $H_2O$ ) es el más abundante, mientras que el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) viene en segundo lugar. Luego siguen, en concentraciones menores, gases como el dióxido de azufre ( $SO_2$ ), el ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) y el ácido clorhídrico ( $HCl$ ), entre otros. Estos gases se encuentran inicialmente disueltos en el magma, cuando aquel se encuentra a gran profundidad debajo del volcán. ¿Qué significa eso? Piensa

en una botella de soda. Cuando se embotellan estas bebidas, se les inyecta  $CO_2$  gaseoso con suficiente presión para que se disuelva en el líquido, es decir que las burbujas de gas ya no son visibles, desaparecieron en el líquido. Al momento de abrir la botella, el  $CO_2$  pasa de ser disuelto a gaseoso y se forman un montón de burbujitas de  $CO_2$ . Ocurre un fenómeno similar con un magma. Bajo ciertas condiciones de presión y temperatura, si la concentración de gases no rebasa un cierto límite, el gas se queda disuelto y no forma burbujas. A este límite se le llama “solubilidad de los gases” y depende de varios parámetros como la presión de confinamiento (similar a la presión de “embotellamiento”), la composición del magma y su temperatura. Durante las últimas décadas, los vulcanólogos han realizado experimentos en laboratorio para estudiar las leyes de solubilidad de los gases en los magmas. En la figura 1, se puede observar la solubilidad del agua ( $H_2O$ ) en magmas riolíticos y basálticos en función de la presión. ¿Sabes a que corresponde la unidad % en peso en la figura? ¿Sabes cuál es la diferencia entre un basalto y una riolita?

En esta figura se muestra también la profundidad correspondiente a la presión. Para calcularla,

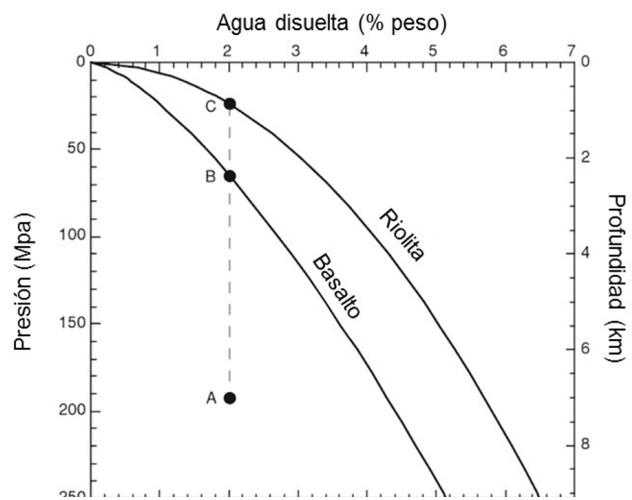


Figura 1. Solubilidad del agua en magmas riolíticos y basálticos en función de la presión y profundidad correspondiente (modificada de Parfitt y Wilson, 2008).

se considera que la presión (que controla la solubilidad de los gases dentro del magma) está regida por el peso de las rocas que constituyen el volcán, es decir la presión litostática. ¿Te queda claro este concepto? La presión litostática se calcula de la siguiente manera:

$$P = \rho \times g \times h \quad (1)$$

Donde P es la presión litostática (en pascal, Pa),  $\rho$  es la densidad de la roca ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), g es la aceleración de la gravedad ( $\text{m}/\text{s}^2$ ) y h es la altura de la columna de roca (m). ¿Conoces la densidad de los magmas? ¿Sabes convertir la unidad de presión pascal a atmósfera (atm)?

Las dos curvas de solubilidad en la figura 1 te dicen cuál es la concentración máxima de agua que un magma basáltico y riolítico pueden disolver a una cierta presión y profundidad correspondiente. Sin embargo, no implica que el magma contenga esta concentración máxima de agua disuelta. Por ejemplo, a una presión de 190 megapascuales (MPa), que corresponde a una profundidad de 7 km, la solubilidad máxima en H<sub>2</sub>O es de 4.2 % en peso (Figura 1). En realidad, el magma a esta profundidad suele contener menos H<sub>2</sub>O, digamos, por ejemplo, 2 % en peso (punto A, Figura 1). En este caso, se dice que el magma es sub-saturado en agua. Si este mismo magma, con este contenido en agua asciende hacia profundidades más someras por flotabilidad, su concentración en agua llegará a igualar a una cierta profundidad su límite de solubilidad. Esto ocurre, de acuerdo a la Figura 1, a profundidades de 2.5 km (punto B) si el magma es basáltico, y a 1 km (punto A) si es de composición riolítica. En este momento, se dice que el magma es saturado en agua. Si el magma sigue ascendiendo hacia la superficie, ya no puede acomodar de manera líquida su contenido de agua, y se empiezan a formar burbujas. En este caso, el magma se vuelve sobresaturado en agua. Si la cantidad de burbujas que se forman es alta, estas burbujas pueden lograr agruparse, y tener el potencial de

fragmentar el magma, lo que lleva a un proceso eruptivo. Al contrario, cuando la cantidad de gases o de magma no es suficiente para provocar una erupción, el volcán se queda en estado de reposo. Esto es a grandes rasgos cómo funciona la dinámica eruptiva de un volcán. En algunos casos, las erupciones pueden ocurrir cuando el magma se mezcla con un acuífero cerca de la superficie. Estas erupciones tienen un nombre particular, investigalo.

### Sistema hidrotermal

Cuando un volcán se encuentra en una región donde llueve con abundancia, el agua de lluvia se filtra dentro del volcán y se mezcla con los gases magmáticos. Se forma lo que se llama un sistema hidrotermal. Al infiltrarse hacia las partes más profundas del sistema hidrotermal, el agua se calienta y se vuelve menos densa que en las partes más someras, pues el magma de la cámara magmática funciona como una fuente de calor. Estas diferentes densidades (flotabilidad) sumadas a la presión generada por la inyección de gases magmáticos generan celdas de convección dentro del sistema hidrotermal (Figura 2). ¿Tienes idea de la densidad del agua a una temperatura de 300°C? La roca que constituye un volcán suele ser altamente fracturada. Si te parece extraña esta terminología, imagina una serie de fisuras o canales delgados y ramificados donde el agua puede circular. Por lo tanto, el agua y los gases del sistema hidrotermal pueden migrar hacia la superficie a través de estas fracturas y formar manantiales de aguas termales y fumarolas en superficie.

También, a veces ocurre que los cráteres volcánicos albergan lagos con colores exóticos, es otro tipo de manifestación de un sistema hidrotermal. La figura 3 es una fotografía del lago cratérico del volcán El Chichón, ubicado en el noroeste del estado de Chiapas. Su color se debe principalmente a las comunidades de algas que viven en sus aguas ácidas.

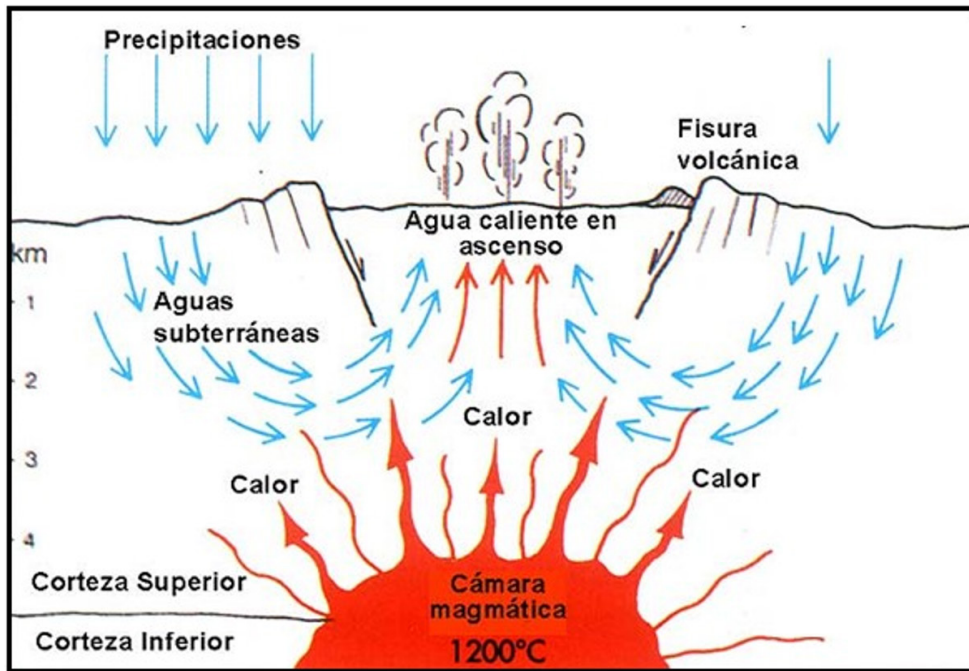
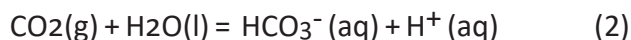


Figura 2. Esquema de un sistema hidrotermal donde se puede observar la cámara magmática, la infiltración de agua de lluvia, los movimientos de convección, fracturas y manifestaciones superficiales como manantiales y fumarolas. Imagen tomada de la página: [http://www.redes-cepalcala.org/ciencias1/geologia/islandia/geologia.islandia\\_nesjavellir.htm](http://www.redes-cepalcala.org/ciencias1/geologia/islandia/geologia.islandia_nesjavellir.htm)



Figura 3. Fotografía del lago cratérico del volcán El Chichón (Chiapas, fotografía por L. Peiffer).

Al estudiar la composición química de los gases fumarólicos y del agua de los manantiales, los vulcanólogos pueden monitorear el estado de un volcán. Por ejemplo, un aumento de la acidez (pH más bajo) de los manantiales puede reflejar un aumento de aporte de gases magmáticos, como el CO<sub>2</sub>. Consideramos la siguiente reacción:



Al disolverse en agua, el CO<sub>2</sub> causa la formación de iones bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e hidrogeno (H<sup>+</sup>). La cantidad de iones de hidrogeno se relaciona al pH por una relación bien conocida que te pedire investigar. Regresando a la reacción (2), los índices (g), (l) y (aq) se refieren a gaseoso, líquido y acuoso, respectivamente.

La clásica ley de acción de masas nos dice que la constante de equilibrio (K) de la reacción (2) equivale a:

$$K = ([\text{HCO}_3^-] \times [\text{H}^+]) / P_{\text{CO}_2} \quad (3)$$

Donde [HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>] y [H<sup>+</sup>] son las concentraciones (unidad: mol por litro, mol/l) de los iones bicarbonatos e hidrogeno, respectivamente, mientras P<sub>CO<sub>2</sub></sub> es la presión (unidad: atmósfera, atm) que el gas CO<sub>2</sub> ejerce sobre el agua. Formalmente, se llama la presión parcial en CO<sub>2</sub>.

Para poder interpretar correctamente el valor de pH del agua en términos del estado de actividad del volcán, el vulcanólogo necesita primero conocer el valor "normal" del pH del agua, es decir el pH del agua de lluvia antes de haber interactuado con los gases volcánicos, para tener un punto de referencia. Se sabe que el agua de lluvia tiene una P<sub>CO<sub>2</sub></sub> de 3.5 x 10<sup>-4</sup> atm, debido a su equilibrio con el dióxido de carbono de la atmósfera. Ahora, la estequiometría (es decir los coeficientes) de la reacción (2) nos dice que una cantidad X de moles de CO<sub>2</sub>(g) que reacciona con un cuerpo de agua pura, generara la misma cantidad X de moles de bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y

X moles de iones de hidrogeno (H<sup>+</sup>). Con esta información, puedes transformar la ecuación (3) de esta manera:

$$K = X^2 / 3.50 \times 10^{-4} \quad (4)$$

donde X es la concentración en mol/l de ion hidrogeno. Si el valor de K a una temperatura de 25°C es 1.53 x 10<sup>-8</sup>, ¿cuál es el valor de pH de un agua al equilibrio con el CO<sub>2</sub> de la atmósfera? Este valor sería el punto de referencia para el vulcanólogo. ¿Cómo cambiaría el pH del agua si el magma subyacente causa un aumento de 10 veces en el valor de la presión parcial de CO<sub>2</sub> (P<sub>CO<sub>2</sub></sub>)?

### El caso particular de los géiseres

Un géiser es una manifestación muy especial y poco común de un sistema hidrotermal. En efecto, mientras que la mayoría de los volcanes albergan manantiales de agua caliente y fumarolas, muy pocos de ellos presentan manifestación de geiser. Este hecho tiene que ver con las condiciones especiales que se tienen que cumplir para que exista un geiser. ¿Te las sabes? Aquí te las explicamos, y te dejamos unas pistas de reflexión para el día del examen. Imagina primero un reservorio subterráneo lleno de agua fría. Este reservorio está conectado con la superficie a través de un sistema de fracturas. Si estos términos te parecen extraños, mira la figura 4. El reservorio es como una bolsa de agua, mientras que las fracturas se asemejan a una serie de canales o tuberías delgadas y ramificadas.

Debajo del reservorio, a mayor profundidad, se encuentra una fuente de calor que puede ser la cámara magmática del volcán. De manera similar a lo que comentamos anteriormente, el agua más profunda se vuelve menos densa al calentarse y busca subir hacia la parte superior del reservorio, entrar a la red de fracturas y finalmente alcanzar la superficie. Sin embargo, la presión generada por el agua contenida dentro de las fracturas y el

reservorio, llamada presión hidrostática ( $P_{hidro}$ ), tiende a bloquear la ascensión del agua menos densa. Sin embargo, al recibir el suficiente aporte de calor, el agua va a empezar a formar burbujas de vapor, en otras palabras, entra en ebullición. La presión generada por el vapor dentro de cada burbuja se suma, y logra vencer la presión hidrostática. A esta presión del vapor, se le llama sencillamente presión de vapor ( $P_{vap}$ ). Entonces, cuando la presión de vapor rebasa la presión hidrostática, el géiser empieza a emitir un chorro de agua y vapor (entra en erupción).

La presión de vapor en equilibrio con un cuerpo de agua líquida se puede calcular por la siguiente relación:

$$\log_{10} P_{vap} = 5.51 - 2048/T \quad (5)$$

Donde la temperatura es en grados Kelvin, y  $P_{vap}$  la presión de vapor en atmósfera.

Esta relación por sencilla que parezca, se basa en las leyes termodinámicas del agua, pero no entraremos en tanto detalle sobre este tema bastante complejo. Más bien, te dejamos investigar como calcular la presión hidrostática; eso te será útil para estimar a partir de qué valor crítico la presión de vapor puede vencer a la presión hidrostática ( $P_{vap} \geq P_{hidro}$ ). El día del examen, te contaremos unas anécdotas sobre unas personas que provocaron erupciones de geiseres, basándose en este principio.

### Erupciones importantes, energía liberada y consecuencias

Para poder clasificar las erupciones volcánicas, los vulcanólogos usan una escala llamada el Índice de Explosividad Volcánica (IEV). Es una escala de 8 grados que considera el volumen total de



Figura 4. Infografía ilustrando el funcionamiento de un géiser en 4 etapas. Infografía modificada de <https://expertosendetalles.files.wordpress.com/2013/07/infografia.jpg>. La fotografía corresponde al géiser “Old Faithful” del parque nacional “Yellowstone” (EE.UU.), foto tomada de la galería de fotos del parque nacional.

productos expulsados por un volcán, así como la altura alcanzada por su columna eruptiva. En la Tabla 1, se alistan los nombres de las erupciones correspondientes a cada escala del IEV, así como una breve descripción, el volumen de material expulsado (en metros cúbicos, m<sup>3</sup>) y la altura de la columna eruptiva (en metros, m), así como la frecuencia con la cual ocurre cada tipo de erupción.

¿Te has preguntado qué tanta energía puede liberar una erupción volcánica importante? Durante una erupción, gran parte de la energía esta emitida en forma de calor, es decir energía térmica. La cantidad de energía térmica liberada depende de la cantidad de material eyectado, de su temperatura y también de su composición. Puede variar de 1 MJ/kg (megajoule por kilogramo, mega = 10<sup>6</sup>) para un magma riolítico a una temperatura de 850°C hasta 1.5 MJ/kg

para un magma basáltico a 1150°C. Al estimar la cantidad de material emitido, puedes entonces calcular la cantidad de energía emitida durante una erupción.

Se estima que la energía térmica liberada durante la erupción del volcán Toba, ubicado en la isla de Sumatra en Indonesia, fue equivalente a la detonación de 40 millones de bombas atómicas (como la de Hiroshima), lo que equivale a la explosión de 800 mil millones de toneladas de explosivo trinitrotolueno (TNT), el famoso explosivo. En términos de referencia, una tonelada de TNT equivale a 4.184 GJ (gigajoules, giga = 10<sup>9</sup>). La erupción de Toba fue una de las más grandes jamás registrada, la cual se pudo estudiar a través del mapeo y la estimación volumétrica de sus depósitos volcánicos. En efecto, no hay testimonios históricos de la erupción dado que ocurrió hace aproximadamente 75,000 años.

Tabla 1: El esquema de clasificación de las erupciones volcánicas, llamado el Índice de Explosividad Volcánica (IEV)

IEV	Clasificación	Descripción	Altura	Volumen de material expulsado	¿Qué tan seguido ocurre?
0	Erupción Hawaiana	no-explosiva	< 100 m	< 104 m <sup>3</sup>	Diario
1	Erupción Stromboliana	ligera	<1 km	106 m <sup>3</sup>	Diario
2	Erupción Stromboliana/ Vulcaniana	explosiva	1-5 km	107 m <sup>3</sup>	Semanal
3	Erupción Vulcaniana (sub-Pliniana)	violenta	5-15 km	108 m <sup>3</sup>	Anual
4	Erupción Vulcaniana (sub-Pliniana)/Pliniana	cataclísmica	10-25 km	109 m <sup>3</sup>	Cada 10 años
5	Erupción Pliniana	paroxística	> 25 km	1010 m <sup>3</sup>	Cada 100 años
6	Erupción Pliniana/Ultraplinaiana	colosal	> 25 km	1011 m <sup>3</sup>	Cada 100 años
7	Erupción Ultraplinaiana	super-colosal	> 25 km	1012 m <sup>3</sup>	Cada 1000 años
8	Erupción Ultraplinaiana (Supervolcánica)	apocalíptica	> 25 km	> 1012 m <sup>3</sup>	Cada 100 000 años

Se clasifica como IEV 8 y es considerada como ultraplíniana. Liberó  $\sim 10^{10}$  toneladas de cenizas y  $\sim 10^9$  toneladas de gases azufrados, como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ). Esta mezcla de cenizas y gas alcanza alturas de hasta 37 km por encima del volcán. A estas alturas, la nube volcánica se juntó a la circulación atmosférica de la tierra y empezó a dispersarse alrededor del mundo. Las cenizas y los aerosoles bloquearon los rayos de sol, lo que conllevó a una disminución de la temperatura en el planeta. Se estima que la temperatura anual hemisférica en superficie disminuyó de 3 a 5°C durante el año que siguió a la erupción del volcán Toba. Aunque parece poco, eso ayudó a acelerar la transición climática que se estaba dando en esa época. En efecto, el planeta estaba entrando en un periodo glacial. Además, los gases liberados durante la erupción se mezclaron con el agua de la atmósfera causando lluvias ácidas y destruyendo la vegetación. Se cree que hubo consecuencias terribles para los seres humanos que poblaban la Tierra en estas épocas. En particular, se habla de la teoría de la catástrofe de Toba. Aunque es controversial, esta teoría supone que los efectos de la erupción causaron una casi-extinción de la raza humana, reduciendo la población humana a solamente unas 1,000 parejas reproductoras, lo que habría generado un efecto de cuello de botella en la genética de la especie humana. Sin embargo, estas “súper” erupciones afortunadamente no son tan comunes. Se cree que ocurren cada 100,000 años. ¿Has escuchado de otros “súper” volcanes que podrían generar efectos parecidos?

Otra erupción de dimensiones colosales fue la erupción del volcán Santorini en Grecia, la cual es considerada como responsable de la caída de la civilización minoica, en 1645 AC. Sin embargo, liberó 40 veces menos energía que la erupción de Toba. Su IEV está estimado entre 6 y 7. Dentro de las erupciones más recientes, se destaca por ejemplo en 1980 la erupción de volcán Santa Helena en el estado de Washington, Estados Unidos. Fue de menor magnitud que las de

los volcanes Toba y Santorini (IEV = 5), ¡¡¡ solo se compara a la explosión de 12,000 bombas atómicas !!! En el año 1982, el volcán El Chichón (Figura 3) salió de un largo periodo de reposo que había durado varios siglos. A lo largo de una semana (del 28 de marzo al 4 de abril de 1982), el volcán tuvo 3 erupciones explosivas con columnas eruptivas que alcanzaron alturas de más de 25 km, por lo que la erupción se clasificó como un IEV 5, como el Monte Santa-Helena. La erupción se considera como uno de los peores desastres naturales en México, los flujos piroclásticos emitidos por el volcán destruyeron 9 pueblos matando aproximadamente 2,000 personas. Para el examen, te pedimos investigar sobre los flujos piroclásticos: ¿Qué son, que tan caliente y a qué velocidad se pueden desplazar? ¿Por qué son más peligrosos que los flujos de lava?

Las consecuencias de una erupción no siempre son tan negativas. En el año 2010, la erupción del volcán islandés con nombre Eyjafjallajökull (IEV 4) emitió cenizas hacia la atmósfera, las cuales viajaron al sur hacia Europa. Dado que las cenizas volcánicas son fragmentos de roca muy finos (¿qué tan finos?), pueden llegar a tapar los reactores de los aviones. Por esta razón, los gobernantes europeos decidieron cerrar el espacio aéreo durante más de una semana, lo que se tradujo en pérdidas económicas importantes, además de caos y estrés para todos los pasajeros varados en los diversos aeropuertos europeos afectados. Pero ahí va lo bueno... Al no volar durante este tiempo, la cantidad de  $\text{CO}_2$  que generalmente emiten los aviones al quemar carburante, pues simplemente no se emitió. Se estima que durante este periodo los aviones hubieran emitido 344,109 toneladas de  $\text{CO}_2$ . Como ahora ya sabes, los volcanes también emiten  $\text{CO}_2$ . ¿Cuánto  $\text{CO}_2$  fue liberado por el Eyjafjallajökull durante este mismo periodo? 150,000 toneladas. Por lo tanto, gracias al volcán Eyjafjallajökull, la tierra se ahorró una contaminación de 206,465 toneladas de  $\text{CO}_2$ .

¿Conoces otras ventajas relacionadas a la presencia de los volcanes? Las tierras volcánicas son generalmente muy fértiles. Los depósitos volcánicos como las cenizas contienen nutrientes que convierten los suelos en lugares fértiles para la agricultura. Te sugerimos investigar sobre otras ventajas para el día del examen.

### Volcanes de México: monogénéticos versus poligenéticos

Existen miles de volcanes sobre el territorio mexicano, pero afortunadamente solo una decena de ellos son considerados como activos. Ya hemos hablado del volcán El Chichón, seguro has escuchado hablar del Popocatepetl y del volcán de Colima. En el siguiente mapa (Figura 5) podrás ver la ubicación de algunos volcanes de México. ¿Sabes cuáles son los activos?

¿Te sabes la historia del volcán Parícutín, el volcán más joven de México? El 20 de febrero del año 1943, entre los poblados de San Juan Parangaricutiro y Angahuan, en el estado de Michoacán, un campesino de nombre Dionisio Pulido trabajaba en su campo cuando de repente se abrió una grieta de la cual salió humo y un olor fétido a azufre. Un par de horas después, la grieta se hizo más grande y empezó a expulsar cenizas y bloques de roca. El día después por la mañana, Dionisio descubre en su propiedad un cono volcánico constituido de cenizas y escorias que alcanzaba una altura de 10 metros. ¡¡¡Había nacido el volcán Parícutín, su erupción duró 9 años y 11 días!!! La lava emitida por el volcán recorrió unos 10 kilómetros, sepultó las casas de los poblados y rodeo una iglesia. Hoy en día, alcanza una altura de aproximadamente 280 m sobre su base (Figura 6).

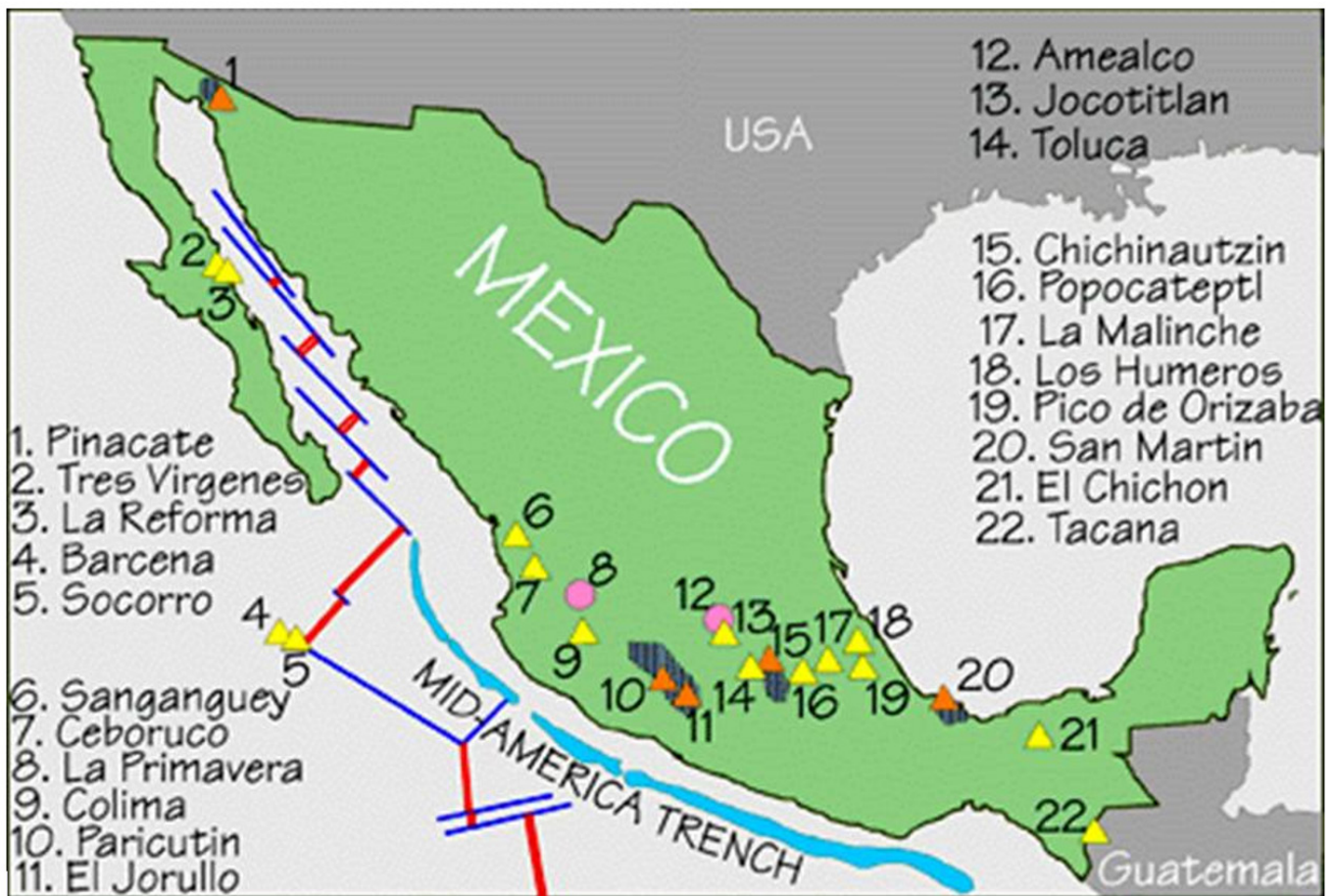


Figura 5. Localización de algunos volcanes de México. Mapa tomado de <http://www.economia-sniim.gob.mx/sicia/Volcanes.htm>.



Figura 6. a) El Parícutín durante su periodo eruptivo (Fuente: <http://morelianas.com/eventos-morelia/exposicion-volcan-paricutin-memoria-paisaje>). b) Iglesia parcialmente sepultada por el flujo de lava (Fotografía por L. Peiffer).



Figura 7. Imagen satelital del campo monogenético de San Quintín, ubicado al oeste de la ciudad de San Quintín, Baja California (Fuente: Google Earth).

A pesar de los importantes daños materiales, afortunadamente no hubo víctimas humanas, dado que la gente tuvo tiempo de desalojar. Actualmente, el Parícutín es considerado como un volcán “monogenético”, es decir que solo tuvo un periodo eruptivo, y no volverá a entrar en erupción. Su morfología en forma de cono de baja altura ( $\leq 400$  metros sobre el terreno base) es característica de este tipo de vulcanismo. Los volcanes monogenéticos son los más abundantes en México y se estiman en más de 3000. Se encuentran generalmente agrupados y forman campos de volcanes monogenéticos. ¿Conoces el campo de volcanes monogenéticos al oeste de la ciudad de San Quintín, en Baja California? Se aprecian en la figura satelital siguiente (Figura 7), un total de 11 edificios volcánicos formados por escudos de lava y conos de ceniza, de los cuales uno forma la isla San Martín. Se formaron entre 126,000 y 90,000 años atrás, o si queremos referirnos a la escala de tiempo geológico, durante el final de la época Pleistocena. También, a sólo unas horas de Mexicali, en el estado de Sonora, se encuentra el campo volcánico El Pinacate, el cual cuenta con más de 400 conos monogenéticos, de edad Pleistoceno tardío a Holoceno. Te invitamos a apreciar estos conos a través del programa Google Earth.

En el sentido opuesto, a un volcán cuya actividad eruptiva alterna entre periodos de erupción y periodos de descanso, se le llama “poligenético”. El Popocatepetl, el volcán de Colima, El Chichón, Tacaná, Evermann (Isla de Socorro), Ceboruco, Pico de Orizaba, así como el complejo volcánico Tres Vírgenes son ejemplos de este tipo de actividad en nuestro país. ¿Ubicas estos volcanes? Algunos de estos volcanes alcanzan grandes alturas mientras que otros no. ¿Sabes por qué? ¿Qué controla la altura de los volcanes? Te invitamos a revisar estos conceptos para el día de examen.

## Últimas palabras...

Por favor recuerden que es muy conveniente para nosotros que se inscriban con anterioridad a través de la página <http://olimpiadas.ugm.org.mx>. Esto nos permitirá planear mejor la cantidad de exámenes que debemos preparar, además de realizar los gafetes con sus nombres, imprimir los diplomas de participación, organizar el número de mesas y sillas que necesitaremos, así como la cantidad de comida que debemos ordenar. Se regalará una playera para cada participante registrado antes del 15 de junio 2018.

Esperamos que hayas disfrutado leer esta guía y que hayas aprendido algo nuevo sobre este mundo que es la vulcanología. ¡Te esperamos el 22 de junio en CICESE!

### Itinerario del día

8:00-9:45: registro y entrega de gafetes con sus nombres. Habrá pan, café, chocolate y frutas para quienes no hayan desayunado.

9:45-10:00: Discurso de bienvenida.

10:00-12:00: Examen<sup>1</sup>.

12:00-14:00: Visita guiada a varios laboratorios<sup>2</sup>.

14:00-14:30: Comida.

14:30-15:00: Ceremonia de premiación.

1 Durante el examen, los profesores visitaran los laboratorios.

2 Para no repetir la visita, los profesores e investigadores del CICESE tendrán una mesa redonda con título: ‘Educación en geociencias a nivel preparatoria’.

## XXIII Olimpiada en Ciencias de la Tierra Problemas

Nota: Los primeros 25 problemas están relacionados al tema de este año 'Erupciones volcánicas'. Las 75 preguntas restantes son extraídas de las tres ediciones pasadas organizadas del 2015 al 2017, cuyos temas en orden cronológico fueron: "Geotermia y la Teoría de la Tierra Bola de Nieve", "Energía" y "El Cosmos y Nuestro Planeta". Para cada pregunta, existe una sola respuesta correcta.

1. La figura 1 te permite calcular la concentración máxima de agua (en unidad de porcentaje en peso) que puede disolver un magma basáltico o riolítico en función de la presión.

Es aceptado que la presión que controla la solubilidad de los gases en el magma es la presión litostática, es decir, la presión causada por el peso de las rocas que constituyen el volcán. Recuerda que la presión litostática se obtiene de la siguiente manera:

$$P = \rho \times g \times h \quad (1)$$

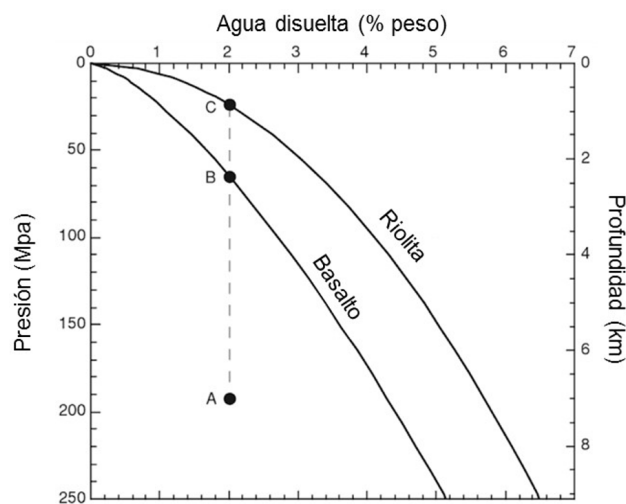


Figura 1. Solubilidad del agua en magmas riolíticos y basálticos en función de la presión y profundidad correspondiente (modificada de Parfitt y Wilson, 2008).

Donde  $P$  es la presión litostática (en pascal, Pa),  $\rho$  es la densidad de la roca ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $g$  es la aceleración de la gravedad ( $\text{m}/\text{s}^2$ ) y  $h$  es la altura de la columna de roca (m).

Como ejemplo, consideremos el caso de un magma que tiene una concentración de 2% en peso de agua disuelta y se encuentra a una cierta profundidad donde la presión litostática es de 190 MPa. Este magma ocupa la posición A en la figura 1. Si este magma migra a profundidades más someras, su contenido en agua puede rebasar su límite de solubilidad. A partir de este momento, se empezarán a formar burbujas de gas, las cuales al agruparse podrían iniciar una erupción de tipo magmática.

Si consideras una densidad promedio de las rocas volcánicas de  $2800 \text{ kg}/\text{m}^3$ , ¿cuál es la concentración máxima en agua que puede disolver un magma basáltica a una profundidad de 4 kilómetros?

- a) 1 % en peso      b) 2% en peso  
c) 3 % en peso      d) 4 % en peso

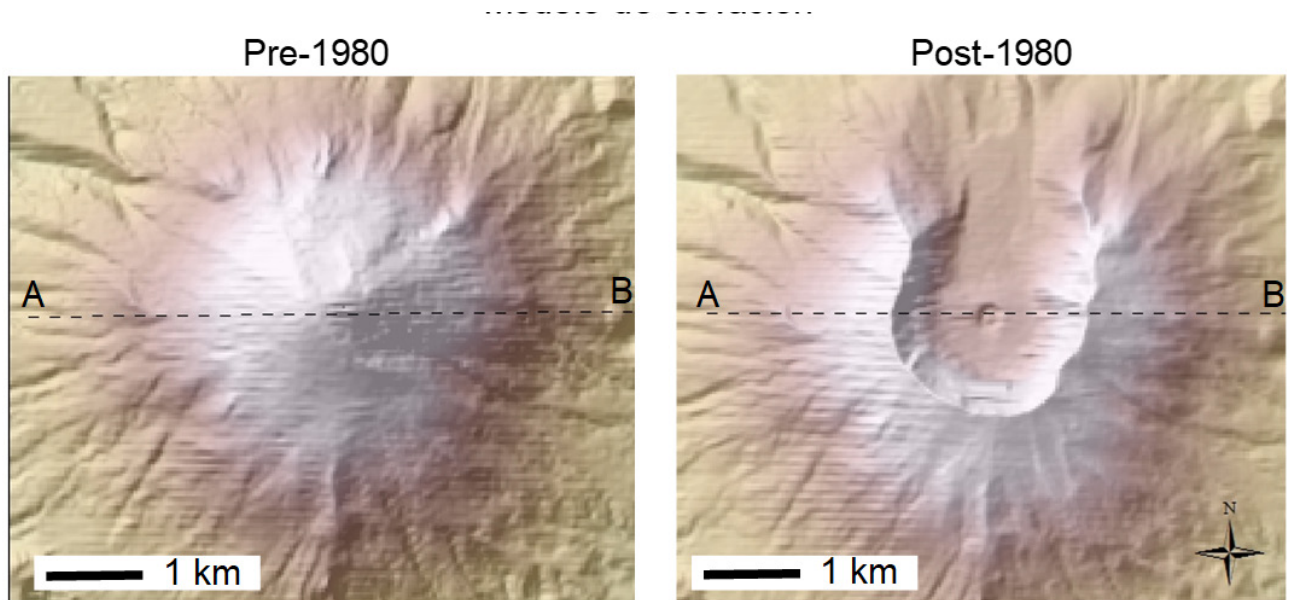
2. Con la ayuda de la figura 1 contesta esta pregunta. A un magma de composición riolítica con una concentración en agua de 3% en peso, la cual se encuentra a una profundidad de 3 kilómetros, se le dice que es:

- a) Sub-saturado en agua.  
b) Saturado en agua.  
c) Sobresaturado en agua.  
d) Supercrítico.

3. Una concentración de agua disuelta en el magma de 2 por ciento en peso es equivalente a:

- a) Una cantidad de 2 kg (kilogramos) de agua disuelta dentro de 500 kg (kilogramos) de magma.  
b) Una cantidad de 1 g (gramo) de agua disuelta dentro de 50 g (gramos) de magma.





Perfiles de elevación (A-B)

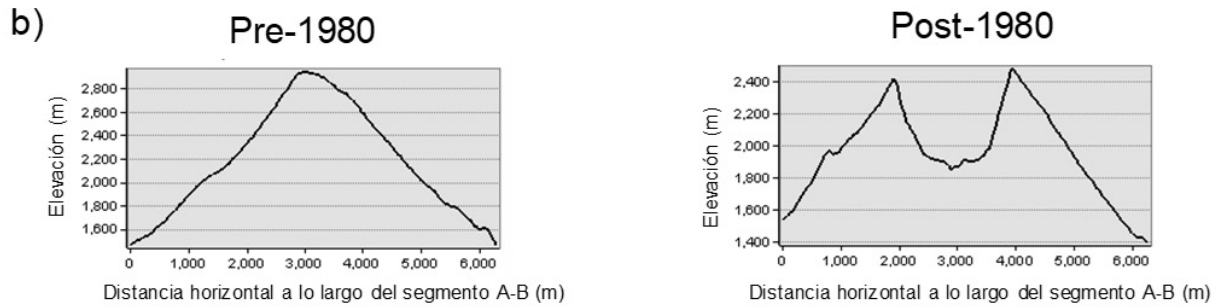
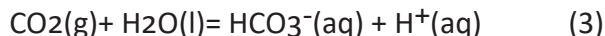


Figura 2. a) Modelos y b) perfiles de elevación del volcán Santa-Helena antes y después de la erupción del 1980. Imagen modificada de <https://lholmesmaps.wordpress.com/my-work-2/5-2/>

9. El despertar de un volcán se puede manifestar en superficie por un aumento de la desgasificación en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Al monitorear el pH de los manantiales termales, el vulcanólogo puede detectar este aumento de desgasificación. En efecto, el CO<sub>2</sub> al disolverse en agua causa una disminución del pH del agua de manantial de acuerdo a la reacción:



Para poder interpretar correctamente el valor de pH del agua en términos del estado de actividad del volcán, el vulcanólogo necesita primero conocer el valor “normal” del pH del agua, es decir el pH del agua de lluvia antes de haber interactuado con los gases volcánicos, para tener un punto de referencia. Se sabe que el agua de lluvia tiene una presión de dióxido de carbono (PCO<sub>2</sub>) de  $3.5 \times 10^{-4}$  atm (atmósfera), debido a su equilibrio con el dióxido de carbono de la atmósfera.

Considera que la reacción de disolución del CO<sub>2</sub> en agua pura ocurre a 25°C, y que la constante de equilibrio de la reacción es de  $1.53 \times 10^{-8}$ .

¿Cuál es el valor del pH del agua pura en equilibrio con el CO<sub>2</sub> atmosférico a 25°C?

- a) 4.1      b) 4.6
- c) 5.2      d) 5.6

10. Esta pregunta está conectada a la anterior. Si la desgasificación del magma causa un aumento de la presión en CO<sub>2</sub> (PCO<sub>2</sub>) de un factor 100 comparado al valor normal de un agua pura equilibrada con el CO<sub>2</sub> atmosférico, ¿Cuántas unidades va a bajar el pH en respuesta a este aumento de PCO<sub>2</sub>?

- a) 1      b) 1.5
- c) 2      d) 2.5

11. La piedra pómez volcánica es un producto común de las erupciones explosivas. Se produce cuando pedazos de magma viscoso con alto contenido en gas son proyectados al aire. Al caer sobre el suelo y enfriarse, los gases se pierden en la atmósfera, pero el espacio que estaba ocupado por las burbujas de gas queda grabado en la roca, lo que confiere a la piedra pómez un aspecto similar a un queso con huecos. Esta particularidad se expresa por una densidad de la piedra pómez muy baja. La densidad de las piedras pómez es tan baja que pueden flotar sobre el agua. La densidad de una piedra pómez puede variar dependiendo del volumen total ocupado por los huecos, los cuales son llamados poros. Ahí te va otra definición. Se le dice porosidad al cociente entre el volumen ocupado por los poros dividido entre el volumen total de una roca. En porcentaje, la porosidad se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Porosidad (\%)} = (\text{volumen de los huecos} / \text{volumen total}) \times 100 \quad (4)$$

Por ejemplo, una porosidad de 20% significa que en un volumen de roca de 1 m<sup>3</sup>, los poros ocupan 0.20 m<sup>3</sup> del volumen total de la roca.

De los valores siguientes de porosidad, elige el valor de porosidad más realista para una piedra pómez. Recuerda que la piedra pómez flota sobre el agua. Considera que la sílice que constituye mayoritariamente la piedra pómez tiene una densidad de 2600 kg/m<sup>3</sup>.

- a) 20%      b) 30%
- c) 40%      d) 70%

12. Considerando el resultado de porosidad de la pregunta anterior, ¿cuál es la densidad de esta piedra pómez?

- a) 780 kg/m<sup>3</sup>      b) 990 kg/m<sup>3</sup>
- c) 1250 kg/m<sup>3</sup>      d) 1600 kg/m<sup>3</sup>

13. Un géiser entra en erupción cuando la presión del vapor vence la presión hidrostática. Por presión hidrostática, nos referimos a la presión generada por el peso del agua contenida dentro del reservorio y las fracturas. Basándose en este concepto físico, un islandés que poseía un géiser dentro de su propiedad encontró una manera de provocar la erupción del geiser cuando él quería, con el fin de impresionar a los turistas que lo visitaban. Dado que el géiser se encontraba ubicado sobre el flanco de un cerro, tuvo la idea de perforar un pozo horizontal dentro del cerro hasta llegar al conducto vertical del géiser. De esta manera, solo tenía que abrir la llave del pozo para bajar el nivel del agua dentro del conducto vertical del géiser, lo que inducía una disminución de la presión hidrostática dentro del geiser. La siguiente figura es un esquema de lo que te acabamos de contar.

Considera las siguientes características del sistema:

1. La temperatura promedio del agua dentro del reservorio es de 150°C.
2. La presión hidrostática ejercida sobre el reservorio corresponde a la presión generada por el peso de la columna de agua contenida dentro del conducto vertical. Esta columna mide 100 m de longitud.
3. Para simplificar el problema, considera que la densidad del agua dentro del conducto vertical es de 1000 kg/m<sup>3</sup>.

La siguiente formula te permite estimar la presión de vapor dentro del reservorio:

$$\log_{10} P_{\text{vap}} = 5.51 - 2048/T \quad (5)$$

Donde la temperatura es en grados Kelvin ( $^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15$ ), y  $P_{\text{vap}}$  es la presión de vapor en unidad de atmósfera (atm).

La presión hidrostática ( $P_{\text{hidro}}$ ) que se opone a la presión de vapor se calcula de la siguiente manera:

$$P_{\text{hidro}} = \rho_{\text{agua}} \times g \times h \quad (6)$$

Donde la presión esta en unidad de pascal (Pa),  $\rho$  es la densidad promedio del agua (kg/m<sup>3</sup>),  $g$  es la aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>) y  $h$  es la altura de la columna de agua en metros (en este caso 100 m). No olvides que una presión de 1 atmosfera equivale a 101,325 pascales.

La pregunta es: ¿A cuántos metros mínimo por debajo de la cima del cerro tuvo el islandés que perforar su pozo horizontal para causar erupciones del geiser bajo las condiciones anteriormente mencionadas?

- a) 44 m    b) 46 m  
c) 48 m    d) 52 m

14. Encuentra la afirmación correcta:

- a) Una columna de agua de 10m de alto con densidad de 1000 kg/m<sup>3</sup> genera una presión hidrostática de 0.968 atm.
- b) Una columna de agua de 10m de alto con densidad de 1000 kg/m<sup>3</sup> genera una presión hidrostática de 1.936 atm.
- c) Una columna de agua de 10m de alto con densidad de 1000 kg/m<sup>3</sup> genera una presión hidrostática de 2.904 atm.
- d) Una columna de agua de 10m de alto con densidad de 1000 kg/m<sup>3</sup> genera una presión hidrostática de 3.872 atm.

15. Encuentra la afirmación correcta:

- a) La erupción del volcán Toba causó la extinción de los dinosaurios.
- b) La erupción del volcán El Chichón fue la más grande jamás registrada.
- c) El Monte Santa Helena es un volcán monogenético.
- d) La erupción del volcán Toba causó una disminución de 3 a 5°C de la temperatura anual hemisférica durante el año que siguió su erupción.

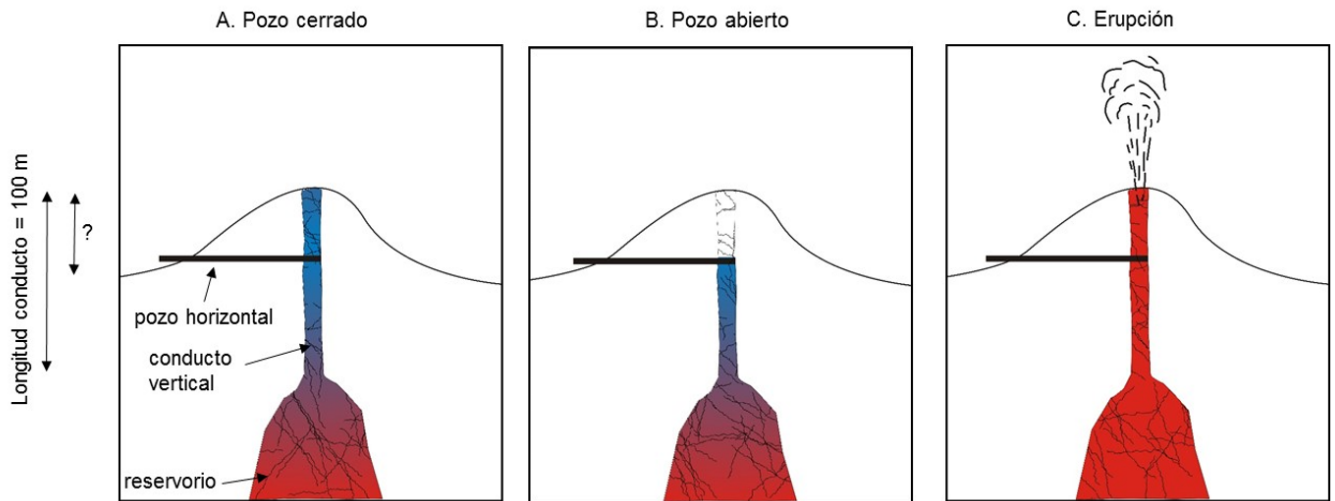


Figura 3. Infografía ilustrando el problema número 13. A. Cuando el pozo horizontal está cerrado, la presión hidrostática rebasa la presión de vapor. B. Al abrir la llave del pozo, se vacía la parte superior del conducto vertical, la presión de vapor se vuelve superior a la presión hidrostática, y C. el geiser entra en erupción.

16. Señala la respuesta más adecuada. Un flujo piroclástico:

- a) Se parece a una lluvia de agua acida e intensa que cae alrededor del volcán durante una erupción pliniana.
- b) Se asemeja a un río de lodo de agua y lodo caliente.
- c) Se puede formar por colapso gravitacional de una columna eruptiva.
- d) Por las tres afirmaciones anteriores.

17. ¿Por qué los flujos piroclásticos son de las manifestaciones más peligrosas que pueden ocurrir durante una erupción volcánica? Señala la respuesta más adecuada:

- a) Porque son nubes constituidas de gases y materia sólida que se desplazan a velocidades de más de 100 km/h dejando poco tiempo para escapar.
- b) Porque alcanzan temperaturas de entre 200°C y 700°C quemando todo en su camino.
- c) Porque son más densos que el aire y bajan del volcán siguiendo los valles.
- d) Por las tres afirmaciones anteriores.

18. Teniendo en mente una velocidad típica de desplazamiento de los flujos piroclásticos, completa la siguiente frase. Un flujo piroclástico emitido por un volcán puede alcanzar un poblado ubicado a 4 km de distancia en:

- a) Menos de 5 segundos.
- b) Menos de 3 minutos.
- c) Horas.
- d) 1 día.

19. Los flujos de lava se pueden asemejar a ríos de roca fundida (magma) que salen de un volcán. Este tipo de manifestación eruptiva es típica de magmas pobres en gases, como se mencionó en la guía de estudios. ¿Te has preguntado si estás en forma como para escapar caminando o corriendo de un flujo de lava? En promedio, un adulto puede caminar a una velocidad de 5 km/hr, correr de manera prolongada a una velocidad de 10 km/hr y tener picos de velocidad de poca duración de 32 km/hr. Ahora bien, la velocidad de un flujo de lava depende de muchos parámetros como: la composición de la lava y su viscosidad, la tasa de emisión del volcán, la pendiente del terreno, entre otros parámetros. Por ejemplo, el frente de un flujo de lava basáltico puede viajar a velocidades de hasta 10 km/hr en un terreno con una gran inclinación. Al contrario, alcanzará

velocidades de menos de 1 km/hr sobre un terreno poco inclinado. Supongamos que te encuentras a 1 km de un volcán, de manera repentina éste comienza a emitir un flujo de lava que viaja en tu dirección sobre un terreno inclinado a una velocidad constante de 10 km/hr. Te asustas al darte cuenta que podrías correr peligro, y empiezas a correr a una velocidad constante de 32 km/hr. Sin embargo, te cansas rápido y después de 20 segundos reduces tu velocidad a 10 km/hr. Conservas este ritmo durante 5 minutos y luego te cansas de nuevo, y empiezas a caminar a una velocidad constante de 5 km/hr. La pregunta es: ¿a partir de qué distancia, considerando tu punto de partida, te alcanzará la lava?

Para resolver este ejercicio, considera que tanto tú como la lava avanzan en línea recta. Afortunadamente, este ejercicio es ficticio porque, aunque no fueras muy bueno para los deportes, en la realidad, podrías correr perpendicular a la dirección del flujo de lava para ponerte a salvo mucho más rápido.

- a) 1133 m    b) 2133 m  
c) 3133 m    d) 4133 m

20. En una edición anterior de las olimpiadas (la XX), se abordó el tema de la energía geotérmica. En la mayoría de los casos, los sistemas geotérmicos son asociados a volcanes, los cuales ya no son lo suficientemente activos para causar erupciones. Sin embargo, el magma a profundidad sigue lo suficientemente caliente como para calentar grandes volúmenes de agua, la cual, es aprovechada para alimentar plantas geotérmicas. Además de poder generar electricidad a partir del calor de un volcán, el agua extraída por los pozos geotérmicos contiene altos contenidos en elementos valiosos, como por ejemplo el Litio (Li). Hoy en día, el Li es un elemento muy buscado por ser un componente esencial de las baterías. Se estima que la planta geotérmica de Cerro Prieto (ubicado al sureste de Mexicali) produce aproximadamente 5,000 toneladas de agua por hora y que la concentración en Li en esta agua es de 20 miligramos por kilogramo de agua. Calcula,

en toneladas, la cantidad de Litio que se podría recuperar teóricamente cada año a partir del agua producida en Cerro Prieto:

- a) 8.76 toneladas    b) 87.6 toneladas  
c) 876 toneladas    d) 8760 toneladas

21. El término “ceniza volcánica” se refiere a un fragmento muy fino de roca volcánica formado durante una erupción explosiva. ¿Cuál es el diámetro de estos fragmentos?

- a) Menos de 2 mm    b) De 2 mm a 1 cm.  
c) De 1 cm a 10 cm    d) Superior a 10 cm

22.Cuál de las siguientes afirmaciones es correcta?

- a) Los volcanes monogenéticos son siempre más altos que los volcanes poligenéticos.  
b) El Parícutín es un volcán poligenético porque su erupción fue prolongada (9 años).  
c) El principal estilo eruptivo del volcán El Chichón es de tipo efusivo.  
d) Los volcanes cuya actividad es principalmente efusiva presentan flancos con pendientes menos inclinados que los volcanes explosivos.

23. El campo volcánico El Pinacate (Sonora) tiene alrededor de 400 conos monogenéticos distribuidos en una superficie circular de 40 km de diámetro. ¿Cuál es la densidad de edificios volcánicos en esta zona? Es decir: Calcula el número de conos monogenéticos por km<sup>2</sup>.

- a) 0.03    b) 0.3  
c) 3    d) 30

24. De las 4 siguientes listas de volcanes, una contiene un volcán que no se encuentra en el territorio mexicano. ¿Cuál es?

- a) Pinacate, Tres Vírgenes, Ceboruco  
b) Popocatepetl, Pico de Orizaba, Tacaná  
c) El Chichón, Reventador, Fuego de Colima  
d) El Parícutín, La Malinche, Nevado de Toluca

25. ¿Hace cuánto tiempo se formó el campo de volcanes monogenéticos de San Quintín?:

- a) Entre 10 y 5 millones de años.
- b) Entre 1 millón de años y 860,000 años.
- c) Entre 126,000 y 90,000 años.
- d) Entre 13,000 y 11,500 años.

<https://expertosendetalles.files.wordpress.com/2013/07/infografia.jpg>

[http://www.redes-cepalcala.org/ciencias1/geologia/islandia/geologia.islandia\\_nesjavellir.htm](http://www.redes-cepalcala.org/ciencias1/geologia/islandia/geologia.islandia_nesjavellir.htm)

Recibido: 9 de febrero de 2019

Corregido por el autor: 11 de febrero de 2019

Aceptación: 25 de febrero de 2019

## Bibliografía

De la Cruz-Reyna, S., Martin del Pozzo, A.L., 2009. The 1982 eruption of El Chichón volcano, Mexico: Eyewitness of the disaster. *Geofísica Internacional*, 48, 21-31.

Giggenbach, W. F. (1980), Geothermal gas equilibria, *Geochimica Cosmochimica Acta*, 44, 2021–2032.

Inbar, M., Hubp, J. L., Villers Ruiz, L., 1994. The geomorphological evolution of the Paricutin cone and lava flows, Mexico, 1943-1990. *Geomorphology*, 9, 57-76.

Kraft, M., 1981. Questions à un volcanologue: Maurice Krafft répond. Hachette, Paris, 234 pp.

Parfitt, E. A., Wilson, L., 2008. *Fundamentals of physical volcanology*. Blackwell Science Ltd, Oxford, 230 pp.

Pyle, D. M., 1995. Mass and energy budgets of explosive volcanic eruptions. *Geophysical Research Letters*, 22, 563-566.

Rampino, M. R., Self, S., 1992. Volcanic winter and accelerated glaciation following the Toba super-eruption. *Nature*, 359, 50-52.

<https://volcano.si.edu/>

<http://ceniza-ecuador.over-blog.com/2016/10/a25-por-que-erupcionan-los-volcanes.html>