



El Deshielo de los Polos y Órdenes de Magnitud

Participantes:

A partir de 12 años.

Presentación:

Esta actividad del DIM consiste en dos partes independientes. Ambas tratan cuestiones sobre grandes cambios que pueden suceder en nuestro planeta. En la primera actividad, las preguntas se centran en el problema del aumento del nivel del mar debido al calentamiento global. En la segunda actividad, la discusión es más general sobre cómo los problemas de estimación relacionados con nuestro planeta pueden abordarse desde un punto de vista matemático y estratégico.

Puedes experimentar con las dos actividades. Cada actividad puede requerir alrededor de una hora, dependiendo de cuánto tiempo se dedique a la discusión. Se puede hacer solo una de ellas, o ambas, una tras otra o en días diferentes.

Como preparación general, solo es necesario familiarizarse con el tema y con los recursos que se dan a continuación, y preparar algunos datos interesantes para compartir con los estudiantes en momentos puntuales.

Actividad 1 - El Deshielo de los Polos

Esta actividad explora lo que sucedería si los casquetes de hielo del planeta se derritieran por completo. En algún momento (tal vez al principio y / o probablemente al final) es conveniente recordar a los alumnos que este es un escenario hipotético, que se plantea para practicar matemáticas, física y nuestro conocimiento de la Tierra. La investigaciones indican que durante el siglo pasado, el nivel medio del mar aumentó unos 16-21 cm, y se espera que aumente unos 30 cm más durante este siglo. Si bien los datos reales son preocupantes y deben abordarse, aquí consideraremos catástrofes más extremas.

1. ¿Qué es lo primero que te viene a la mente?

Empieza por proponer la siguiente pregunta: "¿Qué crees que le sucedería a esta ciudad si el nivel del océano subiera 2 metros?". Incita a tus estudiantes a ser creativos con las respuestas. ¿Cambiaría la costa? ¿Habría migración y refugiados de las ciudades costeras? ¿Falta de producción de alimentos? ¿Algún efecto económico? ¿Cambiarían los ríos su curso? ¿Algún efecto sobre la fauna? El objetivo es hacer que piensen, no dar respuestas correctas (hacia el final se pueden dar algunos datos para ilustrar, véase por ejemplo la referencia [4]). Cambia el valor en la pregunta. ¿Qué pasaría si se subiera sólo 5 cm? ¿Qué pasaría si subiera 10 m?

2. Si el Polo Norte se derritiera

Pregunta qué pasaría si el hielo en el Polo Norte se derritiera. Deja tiempo para que puedan dar sus propias respuestas.

Después de un tiempo, recuérdales que el casquete de hielo del Polo Norte es una masa de hielo que flota en el océano (no consideraremos a Groenlandia como parte del casquete de hielo). Propón el siguiente experimento mental: supongamos que tenemos un vaso de agua lleno hasta el borde, el cual no puede contener más agua. En el agua hay un cubito de hielo flotando. La mayor parte del hielo está bajo el agua, pero hay una esquina del cubito de hielo que sobresale de la superficie del agua. Supongamos que dejamos el vaso con el agua y el hielo a temperatura ambiente hasta que el hielo se derrita. ¿Qué sucederá?, ¿se desbordará el agua?, ¿el nivel disminuirá?

Pregunta: ¿Qué pasaría con el nivel del mar si el casquete de hielo que flota en el Polo Norte se derritiera?

Respuesta: El nivel del mar se mantendría exactamente igual. En el ejemplo del cubito de hielo que flota en el vaso, el nivel se mantendría exactamente igual y no se desbordaría. La explicación involucra la física de la flotabilidad (principio de Arquímedes). Imaginemos que seleccionamos una determinada región del agua en el vaso, una región situada justo debajo y en contacto con la superficie. Ahora imaginemos que el agua dentro de esa región se transforma en hielo. Se expandirá hacia arriba, ocupando parte del aire de arriba. Pero dado que el número de moléculas de agua es el mismo, la masa de ese hielo es exactamente la misma que la del agua que era antes, y por lo tanto, la fuerza de flotabilidad hacia arriba ejercida por el resto del agua es la misma que antes y contrarresta exactamente la fuerza del peso del hielo. El hielo permanecerá flotando en equilibrio.

Por lo tanto, el nivel de los océanos permanecería absolutamente igual si el casquete de hielo del Polo Norte se derritiera. Por supuesto, aunque el nivel del océano no cambiase habría muchas otras consecuencias importantes para el medio ambiente, el clima y el planeta en su conjunto.

3. Si el Polo Sur se derritiera

Ahora puedes dar el dato de que en el Polo Sur le casquete de hielo está sobre la masa de tierra firme continental de la Antártida. Por lo tanto, si la capa de hielo antártica se derritiera, se agregaría mucha agua a los océanos. Pídeles a tus alumnos que calculen cuánto subiría el nivel del mar. Se necesitan algunos datos para dar esa estimación, puedes dejar que tus estudiantes busquen esos datos en línea, o puedes darles las cifras que se proporcionan a continuación. En el caso de dejar a los alumnos buscar los datos, se deberá abrir una discusión sobre qué datos (y fórmulas) son necesarios para resolver el problema. En caso de que algún alumno encuentre un resultado final a esta pregunta en internet, se le puede pedir que justifique o reconstruya ese resultado a partir de datos más básicos.

Pregunta: El hielo en la Antártida cubre un área de tierra de 14 millones de km^2 y tiene un espesor promedio de 2 km. Podemos suponer que la Tierra es una esfera de radio 6371 km cuya superficie es agua en un 70%. El agua es más densa que el hielo, 1 m^3 de hielo es el equivalente a 0.9 m^3 de agua. Si todo el hielo sobre la superficie de tierra de la Antártida se derritiera, ¿cuánto subiría el nivel del mar?

Respuesta: unos 70 m.

El volumen de hielo sobre la superficie terrestre antártica es

$$24 \text{ M km}^2 \times 2 \text{ km} = 28 \text{ M km}^3 \text{ de hielo.}$$

Si ese hielo se derritiera, se convertiría en

$$28 \text{ M km}^3 \text{ hielo} \times (0.9 \text{ m}^3 \text{ agua} / 1 \text{ m}^3 \text{ hielo}) = 25.2 \text{ M km}^3 \text{ de agua.}$$

Por otro lado, la superficie total de la Tierra es

$$4 \times \pi \times \text{radio}^2 = 4 \times 3.1416 \times (6371 \text{ km})^2 = 510 \text{ M km}^2.$$

Si solo el 70% de esa superficie es agua, eso nos da una superficie para los océanos de

$$510 \text{ M km}^2 \times 0.7 = 357 \text{ M km}^2.$$

Ahora podemos suponer que todo el hielo derretido se acumularía en la misma superficie cubierta por los océanos. Como el volumen es igual al área de superficie multiplicada por la altura,

$$\text{Volumen} = \text{Área} \times \text{altura,}$$

entonces el aumento de la altura del nivel del mar (h) es el cociente del volumen de agua añadida dividido por la superficie de los océanos:

$$h = 25.2 \text{ M km}^3 / 357 \text{ M km}^2 = 0.0705 \text{ km} = 70 \text{ m.}$$

Por lo tanto, nuestra estimación es que si todo el hielo en la Antártida se derritiera, el nivel de los océanos aumentaría unos 70 metros.

Podríamos mejorar el modelo? Una opción sería tomar en cuenta que no toda el agua se acumularía sobre el océano, sino que una parte se extendería sobre la parte de tierra firme con poca altura, inundándola.

Pregunta: Asume que un 10% of the la tierra firme sería inundada, y que la altitud media de esa región inundada es de 10m. ¿Cuánto subiría el nivel del mar en ese caso? Estas dos cifras son sólo una estimación a ciegas, cámbialas para ver si el resultado cambia significativamente.

Respuesta:

La superficie de tierra firme es el 30% de la superficie total del planeta.

$$510 \text{ M km}^2 \times 0.3 = 153 \text{ M km}^2$$

Ahora tenemos el 10% de la tierra inundada, es decir,

$$153 \text{ M km}^2 \times 0.1 = 15.3 \text{ M km}^2$$

Dado que esta tierra inundada tiene una altitud media de 10 m, esto significa que la altura media del agua sobre ella será $h - 0.01 \text{ km}$. Aquí la forma de la parte de tierra inundada no es importante, siempre que sepamos que la altitud *media* es de 10 m.

Ahora, el volumen de agua añadida se calcula como:

$$\text{Volumen} = \text{Área}_{\text{océanos}} \times h + \text{Área}_{\text{inundada}} \times (h - 0.01 \text{ km})$$

El volumen total de agua añadida y el área de los océanos son los mismos que en el ejemplo anterior. Resolviendo la ecuación para h obtenemos

$$h = 68 \text{ m.}$$

Por lo tanto, la diferencia es muy pequeña. Esto no es sorprendente: un 10% de tierra firme es solo el 3% de la superficie de todo el planeta.

Podemos jugar con los dos valores como parámetros. El caso extremo es cuando toda la tierra firme tuviera altitud cero, el aumento del nivel del mar sería todavía de 49,4 metros, un valor muy alto.

La referencia [2] da como respuesta un aumento del nivel del mar de 73,32 m, probablemente utilizando datos más precisos que nuestra estimación rápida. La cifra final de este estudio es un aumento del nivel del mar de 80,32 m si incluimos Groenlandia y todos los demás glaciares en la Tierra.

Como señalamos anteriormente, ese es un escenario catastrófico poco probable. Las predicciones son de un aumento de 30 cm para finales de siglo, lo que ya es alarmante por sus implicaciones climatológicas. Otro factor que afecta significativamente al nivel del mar es la dilatación térmica del agua debido a una temperatura más cálida. Esto no solo eleva el nivel del mar sino que también acelera el ritmo de deshielo de los casquetes polares.

Referencias:

Los siguientes recursos pueden servir para enriquecer la discusión con datos del mundo real y con visualizaciones interactivas:

1. Presentación con una visión general de la investigación actual sobre el deshielo de los casquetes polares.
<https://imaginary.org/program/simulating-the-melting-of-ice-caps>
2. Datos reales de los expertos, presentados en un contexto educativo.
<https://serc.carleton.edu/eslabs/cryosphere/6b.html>
3. Mapa interactivo donde observar qué partes del mundo quedarían sumergidas tras una subida del nivel del mar.

<https://www.floodmap.net/>

4. Un 10 % de la población mundial vive en áreas costeras de baja altitud, es decir, a menos de 10 metros de altura sobre el nivel medio del mar.

McGranahan, G., Balk, D., and Anderson, B.: The rising tide: Assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones, *Environ. Urban.*, 19, 17–37, <https://doi.org/10.1177/0956247807076960> , 2007.

Actividad 2 - Órdenes de magnitud en cuestiones sobre la Tierra

¿Cómo podemos responder a preguntas de grandes proporciones cuando tenemos pocos datos? A veces, las estadísticas sobre un fenómeno en particular no están disponibles: tal vez porque el alcance es demasiado grande (por ejemplo, todo el planeta) o demasiado pequeño (tu ciudad, tu escuela), y ninguna institución ha recopilado esos datos. A veces es imposible producir datos porque no podemos dar un recuento exacto (¿cuántos árboles hay en el mundo?), o porque es hipotético (¿cuántos árboles serían necesarios para absorber las emisiones de CO₂ actuales?) Para ese tipo de preguntas , solo buscamos una estimación aproximada del orden de magnitud de la respuesta. Tales estimaciones a menudo se denominan [estimaciones de Fermi](#).

Hay muchos trucos que podemos usar para dar respuestas a estas preguntas. En esta actividad exploramos esta técnica y la aplicamos a algunas preguntas medioambientales relacionadas con el planeta Tierra.

1. Ejemplos básicos.

Propón a tus alumnos que encuentren una respuesta a las siguientes preguntas:

- a. ¿Cuánta comida se consume por día en todo el mundo?
- b. ¿Cuánta basura se produce por día en todo el mundo?
- c. ¿Cuántos litros de agua se necesitan por día en todo el mundo solo para consumo individual (excluyendo industrias y agricultura)?

Para cada pregunta, es necesario obtener una estimación de la propia experiencia (cuánta comida como cada día, cuánta basura produzco ...), y se necesitan también algunas estadísticas básicas como la población mundial (7 mil millones de personas) . Conviene hacer que el alumno reflexione sobre la variabilidad de esas cifras. ¿Es el mismo consumo de alimentos por persona en todo el mundo? ¿Qué hay de la basura? ¿Qué pasa con la basura producida por la industria, es más o menos que la de los individuos? Se pueden encontrar algunas respuestas "oficiales" a estas preguntas buscando en Internet que el profesor puede compartir al final. Se puede abrir una ronda de comentarios después de dar las respuestas "oficiales".

2. Preguntas de información incompleta.

Propón a tus alumnos las siguientes preguntas, en la que necesitarán obtener datos de fuentes indirectas y hacer modelos y estimaciones simples:

- a. ¿Cuántos litros de agua usa la escuela (o el edificio en el que se encuentra ahora) cada semana?

- b. ¿Cuántas briznas de hierba hay en un campo de fútbol (o en cualquier otro campo o jardín deportivo)?
- c. ¿Cuánto CO₂ exhalan todos los estudiantes / participantes por día?

3. Preguntas más intrincadas

Plantea ahora la siguiente pregunta: ¿Cuál crees que es el volumen de todas las botellas de plástico que terminan en el océano todos los días?

Deja que los alumnos propongan los pasos para descomponer el problema y hacer estimaciones. Algunas preguntas que pueden surgir:

- a. ¿Cuál es el orden de magnitud correcto? ¿Kg? ¿Toneladas? ¿Millones de toneladas? ¿Miles de millones de toneladas?
- b. ¿Cuánto plástico produce la humanidad?
- c. ¿Cuánto de ese plástico termina en el océano?
- d. Podemos suponer (¿por qué?) que el plástico mal administrado, no reciclado, viene solo del consumo personal, no de la industria, por lo que podemos tratar de estimar cuánto plástico consume una persona y multiplicarlo por un dato de población.
- e. ¿Cuántas personas viven en zonas costeras (países con costas)? Podemos suponer que sólo los países con costa contaminan los océanos (¿por qué?).

Para cada paso o parte en esta descomposición, podemos intentar hacer una estimación, o tratar de encontrar ese dato en internet.

Es importante mantener abierto el debate. El objetivo es hacer que los alumnos discutan las magnitudes y sus relaciones. Después de un tiempo, deben llegar a un número de consenso.

Finalmente, podemos usar el artículo en la referencia [4] para dar una respuesta experta: entre 4.8 y 12.7 millones de toneladas de desechos plásticos fueron arrojados al océano en 2010, con la perspectiva de aumentar un orden de magnitud (esto es, multiplicarse por 10) para 2025 si no se toman medidas.

Abre una ronda de discusión final sobre las implicaciones de la contaminación de los océanos.

Proyecto extra

Ofrece a tus alumnos como proyecto adicional una última pregunta de Fermi que puedan investigar por sí mismos (por ejemplo, en casa, con amigos o familiares), y que no se pueda encontrar en Internet. Por ejemplo, usando temas locales, como: ¿Cuál es el balance de CO₂ de esta ciudad? Es decir, ¿se emite a la atmósfera más o menos CO₂ del que absorben los árboles?

Recursos

1. Un cómic explicando cómo hacer una estimación de Fermi:
<https://what-if.xkcd.com/84/>
2. Artículo que describe algunos trucos para hacer buenas estimaciones de Fermi:
<https://www.lesswrong.com/posts/PsEppdvgRisz5xAHG/fermi-estimates>

Puedes practicar tratando de resolver estas y otras preguntas, y ayudar a tus alumnos con algunos consejos.

Por ejemplo, el artículo explica cómo hacer una estimación de una magnitud a partir de dos cotas, usando la media geométrica o la media geométrica aproximada (AGM) en lugar de la media aritmética. Esto dará más contenido matemático a la actividad.

3. Ejemplos de estimaciones de Fermi que se pueden usar en la escuela (en general no relacionados con las ciencias de la Tierra):

<https://www.teachertoolkit.co.uk/2017/04/28/fermi-questions/>

4. Artículo de investigación que estudia cuánto plástico hay en el océano:

Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., Law, K. L. (2015). *Plastic waste inputs from land into the ocean*. *Science*, 347(6223), 768–771. doi:10.1126/science.1260352

¡Crea y comparte!

Comparte tus cuestiones, tus razonamientos, discusiones y resultados usando los hashtags **#idm314earth** y **#idm314**.

Recursos adicionales:

1. Recursos educativos sobre las ciencias del clima (proyecto TROP-ICSU):
<https://climatescienceteaching.org>
2. Simulador interactivo del clima:
<https://en-roads.climateinteractive.org/scenario.html>
3. Blog sobre Matemáticas del Planeta Tierra
<http://mpe.dimacs.rutgers.edu/blog/> (en)
4. Más problemas de Fermi para la escuela:
<https://www.teachertoolkit.co.uk/2017/04/28/fermi-questions/>
5. Recursos sobre cómo dirigir una discusión basada en preguntas en la escuela:
 - a. [The right question at the right time](#)
 - b. [Inquiry based maths education](#) (del proyecto FIBONACCI de la UE)

© 2020 IMAGINARY gmbH

Este trabajo está bajo licencia [Creative Commons Attribution 4.0 International License](#).