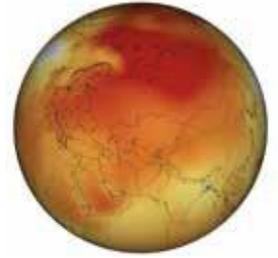


El cambio climático: comprender y actuar

Manual para profesores de secundaria
de la Facultad de Física de la LMU de Múnich



Con experimentos en el maletín climático
de la LMU



www.klimawandel-schule.de

Manual

Antecedentes científicos
Instrucciones para experimentos
Sugerencias para la acción



Dra. Cecilia Scorza
LMU Facultad de Física
Múnich

Prof. Dr. Harald Lesch
LMU Facultad de Física
Múnich

Moritz Strähle
Asam-Gymnasium
Múnich

Dra. Dominika Sörgel
PIK
Potsdam

Con contribuciones del Dr. Markus Nielbock, Gabriel Appl Scorza, Friederike Strähle, Rudolf Pausenberger, Dr. Pascal Eitner, Thomas Hensel, Dr. Uwe Scheithauer, Clemens Bröll, Markus Vogelpohl y Stefan Kröhler.

PUBLICADO POR:

Facultad de Física, Ludwig-Maximilians-Universität
Schellingstraße 4, 80799 Múnich
www.physik.uni-muenchen.de

Dra. Cecilia Scorza Física LMU
E-mail: c.scorza@lmu.de

Facultad de Física LMU, todos los derechos reservados

CONTACTO:

kontakt@klimawandel-schule.de
www.klimawandel-schule.de

DISEÑO GRÁFICO:

Moritz Strähle

FOTOS E IMPRESIÓN:

Christoph Hohmann

CRÉDITOS DE LA IMAGEN:

Dra. Cecilia Scorza

TRADUCCIÓN:

Gladis Magris

VERSIÓN:

Julio de 2021

Impresión respetuosa con el medio ambiente



El gráfico de la portada muestra dos escenarios de simulación del DKRZ (Centro Alemán de Cálculo Climático) y los aumentos de temperatura asociados (ver escala) en la Tierra en 2090, en comparación con la era preindustrial.

En el escenario más positivo (globo terráqueo en primer plano, RCP2.6), el aumento medio de la temperatura global se mantiene por debajo de los 2 °C. En el otro escenario cabe esperar un aumento medio de la temperatura global de 4,8 °C, con considerables fluctuaciones regionales.

Los esfuerzos de la humanidad en los próximos años decidirán qué escenario se hace realidad.

El cambio climático: comprender y actuar

Manual para profesores de secundaria
de la Facultad de Física de la LMU de Múnich

Índice

Prólogo	6
¡Convocatoria a la participación!	7
Capítulo 1 La Tierra: Un planeta muy especial	8
1.1. UN LUGAR TRANQUILO EN LA GALAXIA	8
1.2. LA ZONA HABITABLE DEL SISTEMA SOLAR	8
1.3. LA FORMACIÓN DEL SISTEMA SOLAR Y DE LA TIERRA	9
1.4. SOLO LA TIERRA RETUVO SU AGUA	9
1.5. CÓMO LA LUNA HIZO A LA TIERRA HABITABLE	10
1.6. UN CAMPO MAGNÉTICO COMO ESCUDO PROTECTOR DE LA TIERRA	11
Capítulo 2 Comprender el efecto invernadero	13
2.1. EL SOL COMO FUENTE DE ENERGÍA	13
2.2. LA TIERRA EN EQUILIBRIO RADIATIVO	15
2.3. CÁLCULO DE LA TEMPERATURA EN UNA TIERRA SIN ATMÓSFERA ¹	16
2.4. EL PAPEL DE LA ATMÓSFERA Y EL EFECTO INVERNADERO	18
<i>Excursio: El papel de las nubes en el balance de radiación de la Tierra</i>	23
2.5. ¿QUÉ ES UN GAS DE EFECTO INVERNADERO?	25
<i>Excursio de física cuántica: ¿Cómo lo hacen las moléculas?</i>	25
Capítulo 3 El sistema climático de la Tierra	27
3.1. DIFERENCIA ENTRE TIEMPO Y CLIMA	27
3.2. EL SISTEMA CLIMÁTICO DE LA TIERRA Y SUS COMPONENTES	28
<i>Excursio: Sistemas de circulación atmosférica y cambio climático</i>	32
3.3. CREACIÓN DE LAS ZONAS CLIMÁTICAS	34
<i>Excursio: Modelos meteorológicos y climáticos</i>	36
Capítulo 4 Cambio climático antropogénico	37
4.1. EL EFECTO INVERNADERO ANTROPOGÉNICO	37
4.2. PROCESOS DE RETROALIMENTACIÓN	40
4.3. PUNTOS DE INFLEXIÓN	43
Capítulo 5 Efectos del cambio climático	44
5.1. IMPACTO GLOBAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO	44
5.2. LA ACIDIFICACIÓN DE LOS OCÉANOS	47
5.3. CAMBIO CLIMÁTICO EN ALEMANIA	48
5.4. CAMBIO CLIMÁTICO EN BAVIERA	53
<i>Excursio: Suelos de páramo en Baviera</i>	56

Capítulo 6 Acción.....	57
6.1. NECESIDAD DE ACTUAR	57
6.4. ACCIONES CONCRETAS PARA ALUMNOS.....	65
Capítulo 7 Explorando el cambio climático con el maletín climático	80
ACTIVIDAD 1 – LA TIERRA EN EL SISTEMA SOLAR	81
ACTIVIDAD 2 – LA TIERRA ESTÁ IRRADIADA.....	83
ACTIVIDAD 3 – THE TIERRA, UN PLANETA RADIANTE.....	86
ACTIVIDAD 4 – LAS CLAVES DE LA TEMPERATURA DE LA TIERRA	88
ACTIVIDAD 5 – EL EFECTO DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO	92
ACTIVIDAD 6 – EL AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR	96
ACTIVIDAD 7 – ZONAS CLIMÁTICAS Y CAMBIO CLIMÁTICO	98
ACTIVIDAD 8 – LOS OCÉANOS COMO AMORTIGUADORES DEL CLIMA	101
ACTIVIDAD 9 – LA ACIDIFICACIÓN DE LOS OCÉANOS	102
ACTIVIDAD 10 – CONSECUENCIAS DEL CALENTAMIENTO DE LOS OCÉANOS.....	103
ACTIVIDAD 11 – PUNTOS DE INFLEXIÓN: CUANDO EL CLIMA CAMBIA.....	104
ACTIVIDAD 12 – PUNTOS DE INFLEXIÓN: EL TALÓN DE AQUILES EN EL CAMBIO CLIMÁTICO	107
Bibliografía	109
Otras referencias bibliográficas	113

Prólogo

El cambio climático es el mayor desafío global al que se enfrenta la humanidad en el siglo XXI. Aunque ha habido repetidas fluctuaciones climáticas en la historia de nuestro planeta de 4.600 millones de años, no hay duda que el ser humano es responsable del actual calentamiento global por la emisión de gases de efecto invernadero. El rápido ritmo al que avanza el cambio climático es un problema enorme. Ni la flora y la fauna ni los seres humanos pueden adaptarse tan rápidamente a las cambiantes condiciones medioambientales. La destrucción de especies animales y vegetales, las guerras por el agua y otros recursos, las hambrunas y los flujos migratorios son ámbitos de conflicto causados en parte por el cambio climático. A pesar de muchas otras crisis, el cambio climático es *el tema de este siglo* y, por tanto, también una cuestión clave para el futuro de los estudiantes de hoy.

Los procesos que conducen al cambio climático, así como las consecuencias resultantes, se presentan en este *manual* y se ilustran con el apoyo de los experimentos en el *maletín climático*. Las palabras clave más importantes son: efecto invernadero, flujo de energía y balance energético, equilibrio radiativo y temperatura de equilibrio, radiación térmica, efectos de retroalimentación, así como tiempo y clima. Las referencias cruzadas entre estos temas facilitan la comprensión de los contenidos interrelacionados. El análisis de los fundamentos científicos y las consecuencias del cambio climático es, por tanto, ideal como tema para un proyecto STEM (ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas, por sus siglas en inglés) transversal o interdisciplinar en la escuela.

La acción concreta es al menos tan importante como la comprensión básica de las interrelaciones. Partiendo de una comprensión científica de los antecedentes y las consecuencias, se puede motivar a los alumnos para que actúen de forma razonada, argumentada y responsable. El modo de organizar la acción individualmente y en grupo, así como a nivel social, es un tema que va mucho más allá de las asignaturas STEM y se extiende a las ciencias sociales.

El cambio climático es un reto enorme y al mismo tiempo ofrece una oportunidad para la enseñanza interdisciplinar en uno de los contextos más relevantes de nuestro tiempo.

Los autores

¡Convocatoria a la participación!

Este manual y el maletín climático que lo acompaña forman parte del programa educativo *Cambio Climático: comprender y actuar*, de la Facultad de Física de la Ludwig-Maximilians-Universität München.

El objetivo de este proyecto es hacer comprensibles para los grupos de estudiantes los fundamentos científicos y las consecuencias del cambio climático. Al integrar comprensión y acción, nuestro proyecto permite a los jóvenes debatir, actuar y trabajar en soluciones eficaces a través de proyectos conjuntos de forma fundamentada y argumentada y experimentar así la autoeficacia.

Nuestro programa educativo se basa en tres pilares:



Comprender



Planificar el futuro



Actuar juntos

¡Te invitamos con entusiasmo a participar!

Puedes encontrar toda la información sobre el proyecto en nuestra página web:

www.klimawandel-schule.de

Si estás interesado en trabajar con nosotros para lograr este objetivo, ¡contáctanos!

estaremos encantados de contar con tu colaboración.:

kontakt@lehrernetzwerk-klimawandel.de

"Si queremos dar a las generaciones más jóvenes la oportunidad de adaptarse al cambio climático en la segunda mitad del siglo XXI, debemos limitar el aumento de la temperatura a menos de 2 °C. La investigación, la innovación y la creatividad son esenciales para avanzar hacia una sociedad con bajas emisiones de carbono. Esta transición exigirá enormes esfuerzos públicos y privados".

Jean Jouzel, miembro del IPCC y, por tanto, Premio Nobel de la Paz. Traducido libremente del discurso de apertura de la conferencia sobre el clima "Cambio climático y agua 2018" en Tours, Francia, el 5 de febrero de 2018.

Capítulo 1

La Tierra: Un planeta muy especial

La Tierra es el único planeta del Sistema Solar en el que se ha desarrollado y ha sobrevivido vida compleja durante miles de millones de años. Desde el primer descubrimiento de planetas fuera del Sistema Solar en 1995, se han descubierto más de 4.000 exoplanetas. Sin embargo, solo una docena de ellos se consideran potencialmente aptos para la vida. De ello se deduce que los planetas en los que parece posible la vida son raros y deben tener características muy especiales. La comprensión de cuántos acontecimientos aparentemente aleatorios han tenido que coincidir para que se forme un planeta como la Tierra demuestra lo especial que es nuestro planeta hogar. Por ello, nuestro manual comienza con una descripción de las características astronómicas de la Tierra.

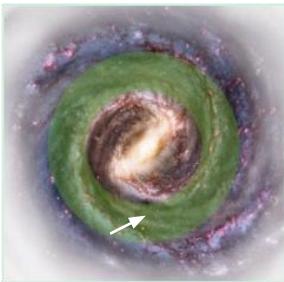


Figura 1 - Ilustración de la posición del Sistema Solar en la Galaxia (Créditos: Mandaro/Adaptación Scorza)

1.1. Un lugar tranquilo en la Galaxia

Nuestra galaxia, la Vía Láctea, es una galaxia espiral que alberga unos 200.000 millones de estrellas. La estrella más importante para la Tierra, el Sol, se encuentra en una región tranquila de la Vía Láctea, fuera de un brazo espiral y lejos del centro galáctico (ver Figura 1). Por lo tanto, también está lejos de las zonas con gran densidad de estrellas y, en consecuencia, fuera del alcance de las estrellas que podrían explotar como supernovas y destruir la vida en la Tierra con su radiación gamma. Esta zona se denomina "Zona Habitable de la Galaxia".

Actividad 1

1.2. La zona habitable del Sistema Solar

Nuestro Sistema Solar está formado por una estrella (el Sol), cuatro planetas rocosos (Mercurio, Venus, la Tierra y Marte), cuatro planetas gaseosos (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno), algunos planetas enanos (por ejemplo, Plutón), las lunas de los planetas, los asteroides y cometas.

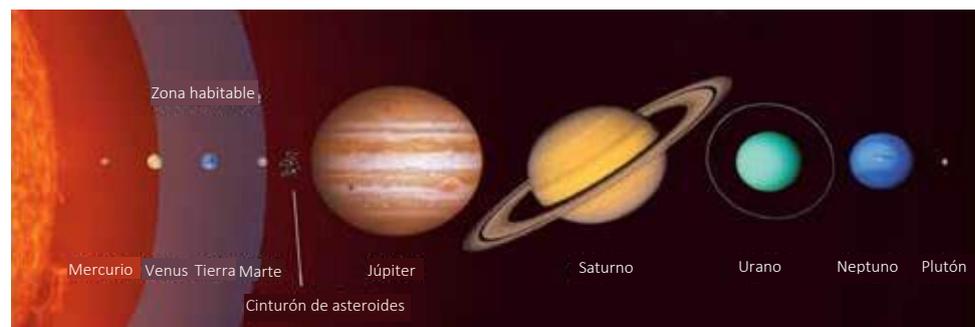


Figura 2 - La Tierra se encuentra en el centro de la zona habitable del Sistema Solar. ¡Atención: al contrario que los tamaños de los planetas, las distancias no están a escala!. (Créditos: NASA/modificado Scorza)

Una medida de la capacidad de un planeta para albergar vida es su distancia a la estrella madre: Si el planeta está situado en la zona habitable de la estrella, es decir, donde puede existir agua en forma líquida, aumentan las posibilidades de que se desarrolle la vida. En el Sistema Solar, Venus está justo fuera de la zona de vida, mientras que Marte está justo dentro [1] (ver figura 2). La Tierra está justo en medio.

1.3. La formación del Sistema Solar y de la Tierra

A pesar de las diferencias entre ellos, los planetas del Sistema Solar, junto con el Sol, se formaron todos hace unos cuatro mil quinientos millones de años, a partir de un disco protoplanetario de gas y polvo (véase la figura 3). Este se formó a partir de la materia residual de la explosión de una supernova, en la que estaban presentes todos los elementos que se produjeron en el núcleo de la estrella por fusión nuclear y durante la explosión de la supernova: desde helio y carbono hasta hierro, oro y uranio. Estos elementos, y también el polvo fino (formado por sílice y grafito), se mezclaron tras la explosión de la supernova con nubes de gas de hidrógeno en el ambiente.

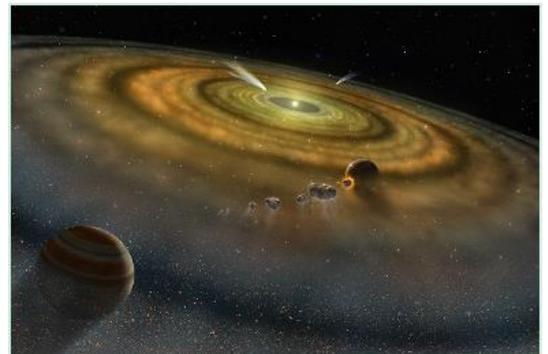


Figura 3 - La formación del Sistema Solar (Créditos: NASA)

Los planetas gaseosos, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, fueron los primeros en formarse en este disco protoplanetario. Como esto ocurrió a gran distancia del Sol, gracias a las bajas temperaturas y con la ayuda de la gravedad, pudieron aglutinar grandes cantidades de gas alrededor de sus grandes núcleos rocosos con relativa rapidez. Por otro lado, los núcleos de los planetas rocosos Mercurio, Venus, la Tierra y Marte se formaron a partir de polvo fino, que posteriormente acumuló material a través de innumerables impactos con otros cuerpos celestes y crecieron hasta alcanzar el tamaño de los planetas. Este proceso de formación duró unos 100 millones de años.

1.4. Solo la Tierra retuvo su agua

Debido a las numerosas colisiones violentas que se produjeron en la primera fase de formación del Sistema Solar, todos los planetas rocosos se formaron como esferas incandescentes muy calientes. Una vez que se enfriaron, estaban secos. Entonces, ¿de dónde provino el agua?

El agua ya estaba presente en el disco protoplanetario. El preciado elemento se acumuló en forma de hielo, especialmente en asteroides porosos y cometas, en zonas remotas más allá de la órbita de Marte (más cerca del Sol se habría evaporado rápidamente).

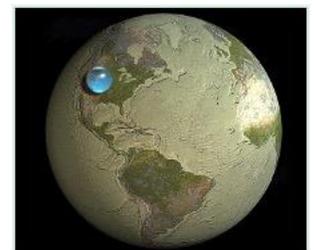


Figura 4 - La gota de agua esférica a escala real contiene toda el agua de la Tierra (Créditos: Perlman&Cook)

Debido a los movimientos migratorios de los gigantes gaseosos Júpiter y Saturno, muchos asteroides que contenían agua fueron catapultados fuera de sus órbitas. Algunos fueron atraídos por el Sol e impactaron contra la superficie de los planetas rocosos interiores, aportándoles agua.

El agua se acumuló en los tres planetas de la zona habitable (Venus, la Tierra y Marte) en forma de vapor de agua. Debido a su proximidad al Sol, el vapor de agua de la atmósfera de Venus se disoció por la radiación ultravioleta del Sol, y el componente volátil de hidrógeno escapó al espacio. Marte, en cambio, era incapaz de retener el vapor de agua debido a su pequeña masa. Solo en la Tierra, con el tiempo, se acumuló cada vez más vapor de agua en la atmósfera. Esto aumentó la presión atmosférica y, cuando la superficie terrestre se enfrió, el agua cayó a la superficie en forma de lluvia. Así se formaron los mares y océanos en la Tierra. Grandes cantidades de CO₂ fueron arrastradas del aire por la lluvia y almacenadas en el lecho marino en forma de piedra caliza. De este modo, la lluvia hizo que la atmósfera terrestre fuera más favorable para la vida. Mucho más tarde, cuando las plantas empezaron a absorber CO₂ y a convertirlo en oxígeno mediante la fotosíntesis, se formó una capa de ozono que protegió la superficie terrestre de la radiación ultravioleta, una condición importante para la diversidad biológica en la Tierra.

1.5. Cómo la Luna hizo a la Tierra habitable

Nuestra Luna se formó hace unos 4.500 millones de años a partir de la colisión de la Tierra con el protoplaneta Theia, que tenía el doble de la masa de Marte. Tras la colisión, gran parte de la materia expulsada se acumuló y se aglomeró en una órbita alrededor de la Tierra: había nacido la Luna.



Figura 5 - Colisión de Theia con la Tierra - la formación de la Luna (Créditos: NASA)

Antes de esto, la Tierra solo necesitaba de tres a cuatro horas para una rotación y su eje de rotación se tambaleaba de un lado a otro. En una Tierra que rotaba a esa velocidad, la atmósfera se desplazaba sobre la superficie a una velocidad de hasta 500 kilómetros por hora. Fue la presencia de nuestro satélite natural la que ralentizó el movimiento de rotación de la Tierra hasta las actuales 24 horas por rotación. Adicionalmente, el eje de rotación fue estabilizado gracias a la Luna y hoy se encuentra ligeramente inclinado, en un ángulo de 23,4° respecto a la eclíptica. Esta inclinación es la que causa las estaciones del año y atenúa las fluctuaciones meteorológicas de la Tierra.

Excursio: El origen del agua

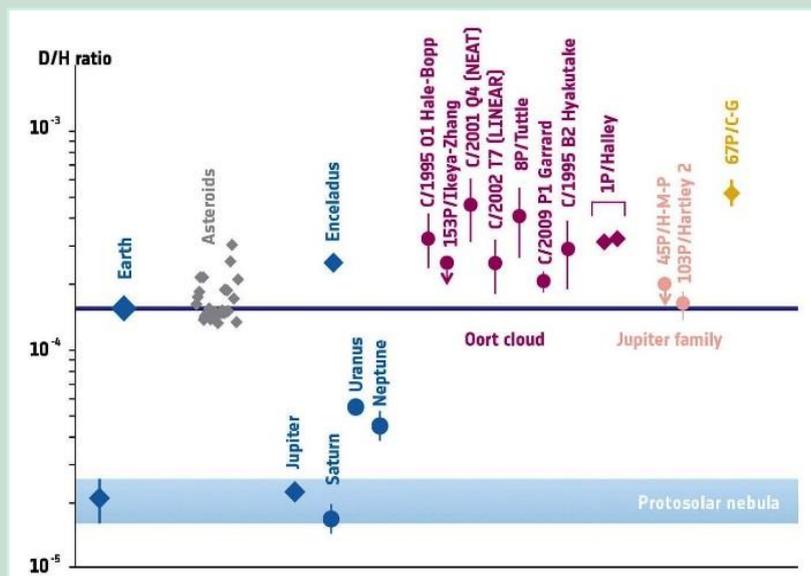


Figura 6 – Razón Deuterio a hidrógeno (D/H) en el Sistema Solar
(Créditos: ESA, en: Altwegg, K. et al, Science 10.1126/science.1261952, 2014, fig. 3)

Un indicio del origen del agua en la Tierra nos lo proporciona su análisis químico: nuestro H₂O tiene una relación de masa característica entre el hidrógeno normal y el deuterio (hidrógeno pesado) de H:D = 1 : 1,5 - 10⁻⁴, la cual también se encuentra en el agua de los asteroides (similar a las condritas carbonáceas).

1.6. Un campo magnético como escudo protector de la Tierra

Muchos planetas tienen un campo magnético permanente débil. La Tierra, en cambio, tiene un campo magnético dinámico, que se mantiene gracias a procesos en su interior. En estos procesos, de manera similar a lo que ocurre en un generador (dinamo), la energía del movimiento se convierte en energía electromagnética. La física subyacente no es fácil de comprender. Explicado de manera sencilla, el calor en el interior de la Tierra hace que una mezcla de rocas fundidas, ricas en hierro, con temperatura de varios miles de grados, ascienda hacia la superficie. A medida que se enfría, parte de esta mezcla vuelve a descender, siguiendo trayectorias helicoidales debido a la fuerza de Coriolis y, de esta forma, se genera el campo magnético. ¿Por qué la Tierra es el único planeta que posee un campo magnético tan fuerte y dinámico?

Es muy probable que la energía del impacto del protoplaneta Theia desempeñe un papel importante. Su núcleo de hierro se hundió casi por completo en el centro de la Tierra durante la colisión. Por tanto, es en parte responsable del calor en el interior de la Tierra y permite la formación de un campo magnético.

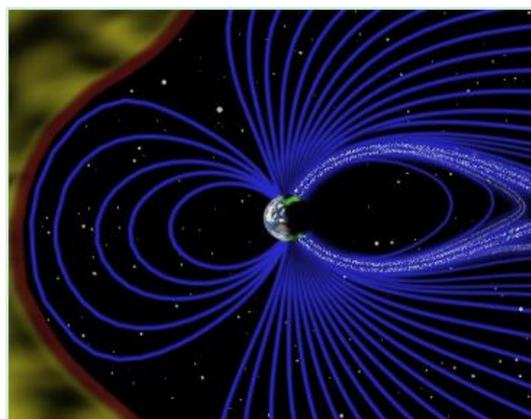


Figura 7 - El campo magnético de la Tierra (Créditos: NASA)

Sin este escudo protector, la superficie de la Tierra estaría completamente expuesta al denominado viento solar. Este está compuesto por partículas cargadas de alta energía que pueden destruir moléculas y hacer imposible el desarrollo de formas de vida complejas. El campo magnético de la Tierra nos protege de este peligro cósmico, ya que desvía las partículas cargadas del viento solar. A veces, en el norte extremo o también en la Antártida, se puede ver brillar el cielo; son las auroras boreales y australes. Estas se originan durante las tormentas del viento solar. En ese momento, es como si se pudiera observar el campo magnético terrestre en pleno funcionamiento como un escudo protector. La energía cinética de las partículas del viento solar es absorbida por las líneas del campo magnético de la Tierra. Esto genera corrientes eléctricas en la alta atmósfera, haciendo que el aire brille, similar a como funciona un tubo fluorescente.

Una pequeña nota: si alguien tiene planes de visitar Marte, debe tener en cuenta que este planeta no posee un campo magnético. Una estancia en Marte podría ser bastante peligrosa.

Conclusión: Varios acontecimientos astronómicos y procesos geológicos contribuyeron a que un planeta rocoso y seco se convirtiera en un mundo habitable.

Las siete características que hacen habitable la Tierra



Capítulo 2

Comprender el efecto invernadero

2.1. El Sol como fuente de energía

Como todas las estrellas, nuestro Sol es un cuerpo celeste masivo que emite luz propia, formado por gas ionizado muy caliente, conocido como plasma. Debido a la fuerte presión ejercida por la masa de gas sobre el centro de la estrella, la temperatura en el núcleo interno de nuestro Sol alcanza unos 15 millones de grados centígrados. A estas altas temperaturas tiene lugar la fusión nuclear: Cuando los núcleos de hidrógeno se fusionan para formar núcleos de helio, la masa se convierte en energía porque el producto de la fusión tiene una masa menor que la suma de las masas de los reactantes. Por lo tanto, según la ecuación de Einstein $E = \Delta m \cdot c^2$, se libera una inmensa cantidad de energía en forma de radiación electromagnética. Cada segundo, el Sol convierte 620 millones de toneladas de hidrógeno en helio.

La radiación solar consiste en ondas electromagnéticas y también en una corriente de partículas (protones, electrones y núcleos de helio), el llamado viento solar. La radiación electromagnética puede clasificarse, según su longitud de onda, en radiación gamma, rayos X, radiación ultravioleta, luz visible, radiación infrarroja y ondas de radio.

Debido a su temperatura superficial de unos 5.500 °C, de acuerdo con la ley de radiación de Planck, el Sol emite radiación electromagnética con longitudes de onda que van desde aproximadamente 400 nanómetros (percibida por el ser humano como violeta) hasta 750 nanómetros (rojo). La mayor parte de la radiación se emite en el rango espectral del amarillo al verde. A lo largo de la evolución, nuestros ojos se han adaptado a esta parte del espectro para que podamos ver las ondas electromagnéticas en este intervalo.

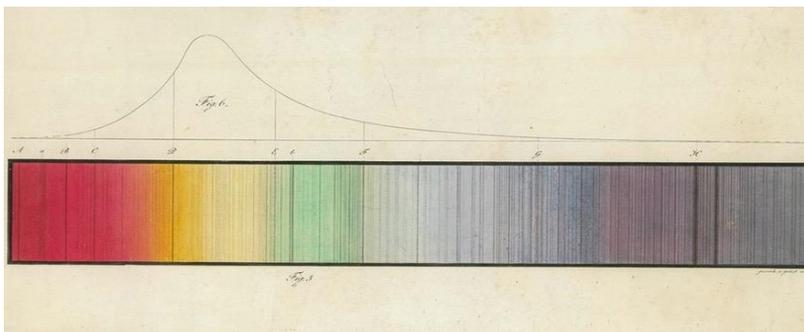
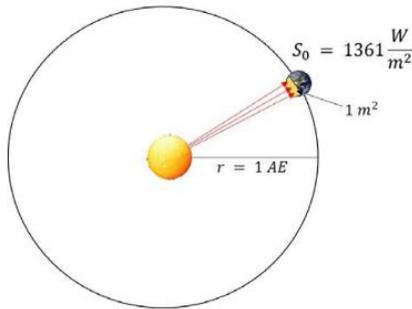


Figura 8 - Líneas espectrales Fraunhofer. Eje x: frecuencia de la radiación EM, eje y: intensidad.
Imagen original: Deutsches Museum München

¿CUÁNTA ENERGÍA RECIBE LA TIERRA DEL SOL?

La energía solar se irradia por igual en todas direcciones. La cantidad que llega a un planeta depende de su distancia al Sol.

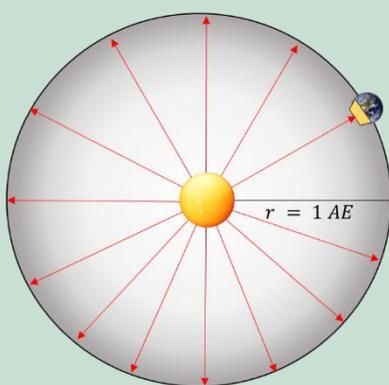


La constante solar S_0 es la intensidad de radiación que llega a la Tierra a una distancia media del Sol, sin la influencia de la atmósfera terrestre, perpendicularmente a la dirección de la radiación. Las mediciones muestran que una potencia radiante de 1361 W [2] alcanza una superficie de 1 m^2 por encima de la atmósfera terrestre (ver Fig. 9, 1 UA = 1 unidad astronómica = distancia media Tierra-Sol).

Figura 9 - Para medir la constante solar, se determina la potencia que incide sobre una superficie de 1 m^2 , a la distancia r entre la Tierra y el Sol. (Créditos: Scorza, Strähle)

Excurso: Cálculo de la potencia radiante total (luminosidad L_0) del Sol

Cuando la radiación solar se propaga en el espacio, la potencia radiante total del Sol se distribuye en una superficie cada vez mayor ($\propto r^2$, ver figura 10). Para calcular la potencia radiante total del Sol, la luminosidad L_0 , imaginemos una esfera con el Sol en su centro y cuyo radio corresponde a la distancia entre la Tierra y el Sol.



$$S_0 = 1361 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$r = 1 \text{ UA} = 149,6 \cdot 10^6 \text{ km} = 149,6 \cdot 10^9 \text{ m}$$

$$A = 4 \pi r^2$$

$$L_0 = A \cdot S_0$$

$$L_0 = 4 \pi r^2 \cdot S_0$$

$$L_0 = 4 \pi (149,6 \cdot 10^9)^2 \text{ m}^2 \cdot 1361 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$= 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W} = 3,83 \cdot 10^{23} \text{ kW}$$

Figura 10 - Toda la radiación solar L_0 se distribuye en la superficie esférica imaginaria (Créditos: Scorza, Strähle)

Toda la radiación solar se distribuye sobre la superficie de esta esfera imaginaria. El radio r de esta esfera corresponde a la distancia de la Tierra al Sol (1 UA), por lo que se puede calcular el área A de la esfera. La luminosidad del Sol L_0 se determina multiplicando la superficie A por la constante solar S_0 . Con la luminosidad L_0 calculada de este modo y las distancias conocidas de los demás planetas al Sol, se puede determinar la constante solar en Mercurio, Venus, Marte, etc. Esto puede utilizarse, por ejemplo, para estimar la posibilidad de vida extraterrestre.

2.2. La Tierra en equilibrio radiativo

El transporte de energía desde el Sol hacia la Tierra se realiza a través de ondas electromagnéticas. En el espectro visible, es decir, en el rango de longitudes de onda de 400 a 750 nm, los gases de la atmósfera apenas absorben radiación solar. Por tanto, esta parte visible de la radiación solar, de onda relativamente corta, llega casi sin obstáculos al suelo, donde es parcialmente absorbida y contribuye así al calentamiento de la superficie terrestre. La Tierra caliente irradia esta energía absorbida al espacio en forma de radiación infrarroja invisible (radiación térmica).

En el promedio a largo plazo, la energía de la radiación térmica emitida por la Tierra hacia el espacio debe corresponder exactamente a la energía radiante del Sol absorbida por la Tierra. Por lo tanto, la Tierra se encuentra en lo que se conoce como equilibrio de radiación con su entorno. Si esto no fuera así, y la Tierra, por ejemplo, absorbiera más energía de la que emite, se calentaría progresivamente con el tiempo. Sin embargo, dado que un cuerpo emite más energía cuanto más caliente está, este calentamiento ocurriría solo hasta que la energía absorbida y la emitida se igualen nuevamente. En ese punto, la Tierra alcanzaría la temperatura de equilibrio correspondiente y volvería a estar en equilibrio radiativo.

En equilibrio radiativo, la radiación solar absorbida por la superficie terrestre debe irradiarse completamente al espacio en forma de radiación térmica de onda larga.

La potencia de la radiación solar que incide perpendicularmente por metro cuadrado (intensidad) en la Tierra es $S_0 = 1361 \text{ W/m}^2$ (constante solar, ver página 14). Sin embargo, no toda la superficie de la Tierra recibe radiación de forma perpendicular; hacia los polos, los rayos solares inciden de forma cada vez más oblicua. Además, en cualquier momento, solo la mitad de la Tierra (un hemisferio) está expuesta a la radiación solar mientras que la otra mitad permanece en la oscuridad. En promedio, la intensidad de la radiación solar se distribuye por toda la superficie de la Tierra $O = 4\pi \cdot r_{\text{Tierra}}^2$. Sin embargo, la intensidad de la constante solar actúa únicamente sobre la sección transversal de la Tierra $A = \pi \cdot r_{\text{Tierra}}^2$, que corresponde exactamente a 1/4 de la superficie terrestre. De ello resulta que la intensidad media de la radiación solar sobre la Tierra se calcula como:

$$I_{\text{Sol} \rightarrow} = \frac{1361}{4} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 340 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Actividad 3

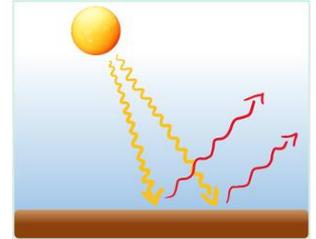


Figura 11 – La superficie terrestre absorbe la radiación solar de onda corta (amarillo) y emite la radiación infrarroja de onda larga (rojo) (Créditos: Scorza, Strähle)

Actividad 2



Figura 12 - La radiación recibida de la Tierra corresponde a la potencia que cae perpendicularmente sobre la sección transversal de la tierra. (Créditos: Scorza)

2.3. Cálculo de la temperatura en una Tierra sin atmósfera¹

Hemos visto que la Tierra está en equilibrio térmico con su entorno. La temperatura media de la superficie terrestre puede estimarse mediante la ley de Stefan-Boltzmann:

$$I = \sigma \cdot T^4$$

Esta ley describe la intensidad de radiación I (en vatios por m^2) emitida por un cuerpo a una determinada temperatura T . La figura 13 ilustra esta dependencia. Cuanto más caliente está un cuerpo, más radiación térmica emite, y esta es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura. Por ejemplo, a doble temperatura (medida en Kelvin), un cuerpo emite 16 veces más radiación por segundo. Utilizando la constante de Stefan-Boltzmann $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$, se puede calcular la intensidad de radiación a partir de la temperatura conocida, o viceversa, inferir la temperatura de un cuerpo si conocemos la intensidad de radiación que emite. Queremos utilizar esto para estimar la temperatura de la superficie de la Tierra.

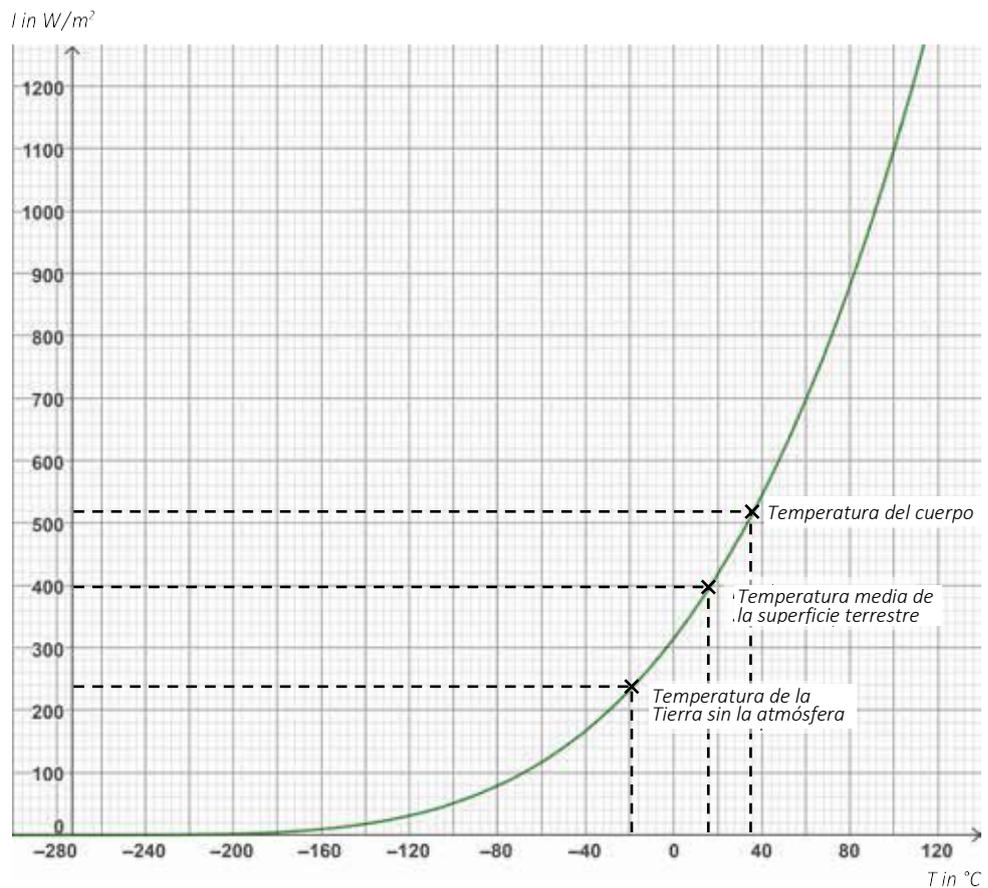


Figura 13 - La figura muestra la ley de Stefan-Boltzmann, es decir, la relación entre la temperatura y la intensidad de la radiación térmica de un cuerpo (Créditos: Strähle, creado con Geogebra)

- 1 En las dos secciones siguientes hemos resumido la presentación del muy recomendable libro "Climate - The Earth and its Atmosphere through the Ages" de Christoph Buchal y Christian-Dietrich Schönwiese [3] como modelo.

En promedio, alrededor del 30% [3] de los 340 W/m² irradiados sobre la Tierra se reflejan directamente al espacio. Esta propiedad de las superficies para reflejar la radiación se conoce como *albedo* α y es particularmente alta en superficies como el hielo. Por lo tanto, la superficie terrestre absorbe una intensidad de radiación menor:

$$I_{\text{Sol} \rightarrow \text{sup.terr}} = (1-\alpha) \cdot I_{\text{Sol} \rightarrow} = 0,7 \cdot 340 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 238 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Imaginemos ahora por un momento que la Tierra no tiene atmósfera. Dado que esta hipotética Tierra rocosa estaría en equilibrio radiativo, la intensidad de la radiación recibida del Sol sería igual a la intensidad de la radiación emitida por la superficie terrestre, cumpliéndose $I_{\text{Sol} \rightarrow \text{sup.terr}} = I_{\text{sup.terr.} \rightarrow \text{espacio}}$. Este balance de radiación se muestra en la Figura 14.

Como se ha descrito anteriormente, la intensidad de la radiación térmica de la superficie terrestre está relacionada con su temperatura:

$$I_{\text{Sol} \rightarrow \text{sup.terr.}} = I_{\text{sup.terr.} \rightarrow} = 238 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = \sigma \cdot T^4$$

Esta ecuación se resuelve para la temperatura T:

$$T = \sqrt[4]{\frac{(1-\alpha) \cdot I_{\text{Sol} \rightarrow}}{\sigma}} = \sqrt[4]{\frac{238 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}}} = 255 \text{ K} = -18^\circ \text{ C}$$

En nuestra ficticia Tierra rocosa, donde la radiación térmica de la superficie terrestre puede escapar sin obstáculos al espacio, la temperatura sería de ¡-18 °C!

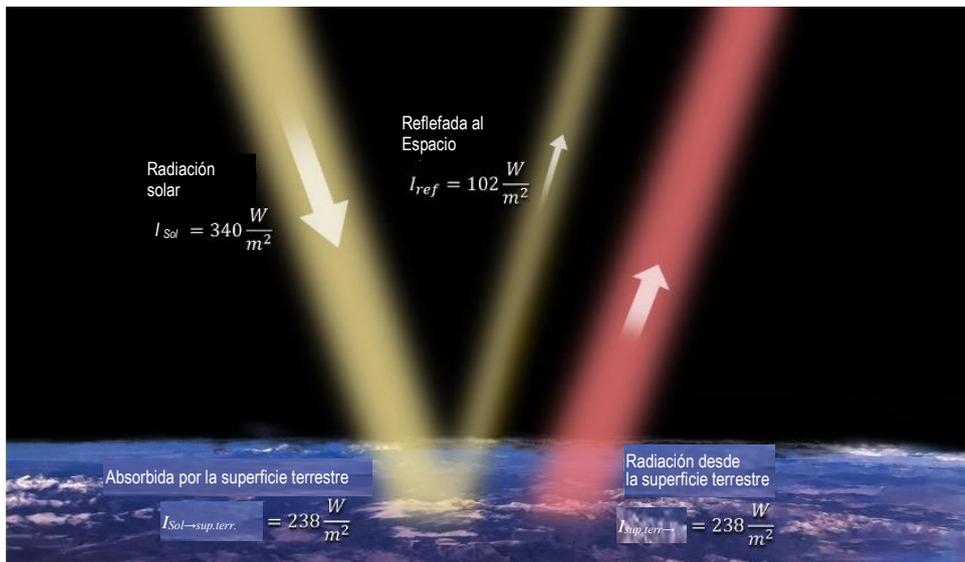


Figura 14 - Balance de radiación de una Tierra rocosa sin atmósfera (Créditos: Strähle, Hohmann)

2 Como recordatorio: 0 K corresponde a una temperatura de 273,15 °C.

Los cambios en la intensidad de la radiación solar $I_{\text{Sol} \rightarrow \text{Tierra}}$ o los cambios en el albedo α afectan directamente la temperatura de la Tierra. Si el albedo de la Tierra disminuye, por ejemplo, debido al deshielo, la temperatura de la Tierra aumentará hasta que el equilibrio de radiación se restablezca a una nueva temperatura de equilibrio más elevada.

Actividad 4

2.4. El papel de la atmósfera y el efecto invernadero

Como se muestra en la última sección, nuestra Tierra tendría una temperatura de -18°C en el modelo de Tierra rocosa sin atmósfera y no se habría desarrollado la vida. Afortunadamente, la atmósfera terrestre absorbe parcialmente la radiación térmica del suelo y la irradia en todas direcciones, incluida la superficie terrestre. A continuación veremos los procesos subyacentes:

La radiación solar incidente sigue siendo $I_{\text{Sol} \rightarrow} = 340 \text{ W/m}^2$. Volvemos a suponer que la fracción $\alpha = 0,3$ se refleja al espacio³. Esto corresponde a una radiación reflejada $I = 102 \text{ W/m}^2$. Por lo tanto, aproximadamente el 70% de la radiación incidente no se refleja y, según nuestro modelo, es absorbida por la superficie terrestre:

$$I_{\text{Sol} \rightarrow \text{sup.terr.}} = (1-\alpha) \cdot I_{\text{Sol}} = 238 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Actividad 5



Figura 15 - Montaje del experimento de la actividad 5 del maletín climático.

Dado que en este caso la Tierra también se encuentra en equilibrio de radiación, la energía absorbida debe ser emitida de nuevo en forma de radiación térmica infrarroja, como en el caso de la Tierra rocosa. Los gases de efecto invernadero, como el CO_2 , el metano y el vapor de agua, tienen la propiedad de absorber parte de esta radiación térmica emitida por la superficie terrestre. Esto puede demostrarse con un experimento relativamente sencillo, como se muestra en la Actividad 5 en la página 92: La temperatura de equilibrio en el cilindro, inicialmente llena de aire e irradiada con una lámpara de infrarrojos, aumenta significativamente tras la adición de CO_2 .

Volvamos a nuestro sencillo modelo radiativo: suponemos que la atmósfera transmite toda la radiación solar (ya que es de onda relativamente corta), pero absorbe una gran proporción de la radiación térmica de la superficie terrestre $I_{\text{sup.terr.} \rightarrow}$. Para esta estimación simplificada, supondremos inicialmente que este porcentaje es del 80 %⁴. Por lo tanto, se deduce:

$$I_{\text{sup.terr.} \rightarrow \text{atm.}} = 0,8 \cdot I_{\text{sup.terr.} \rightarrow} \quad (1)$$

3 Esta reflexión ocurre en las nubes, los aerosoles, la atmósfera y la superficie terrestre.

4 En realidad, los procesos son más complejos (ver figura 18) y se presentan en este modelo de manera simplificada con fines didácticos, para ilustrar el principio básico del efecto invernadero.

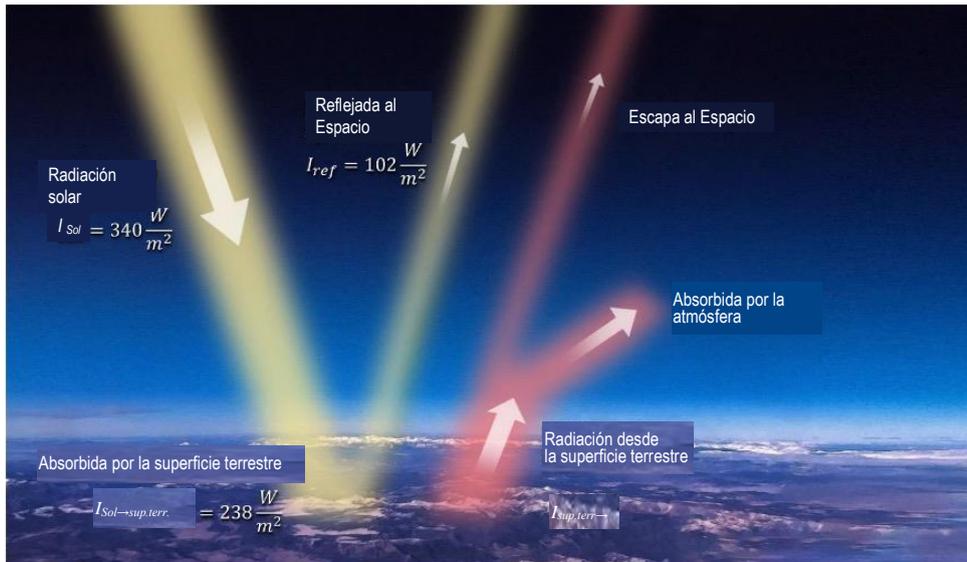


Figura 16 - Paso intermedio hacia un balance de radiación con la atmósfera. (Créditos: Strähle y Hohmann)

La figura 16 muestra los pasos hasta este punto.

Debido a la absorción de la radiación térmica emitida por la superficie terrestre, la temperatura de la atmósfera aumenta, y esta a su vez comienza a emitir radiación tanto hacia la superficie terrestre ($I_{atm \rightarrow sup.terr.}$) como hacia el espacio ($I_{atm \rightarrow espacio}$). Dado que la atmósfera no tiene una dirección preferente para emitir radiación, en este modelo simplificado se asume:

$$I_{atm \rightarrow sup.terr.} = I_{atm \rightarrow espacio} \quad (2)$$

Como la atmósfera también está en equilibrio de radiación, la energía radiada debe corresponder a la energía absorbida, es decir:

$$I_{sup.terr \rightarrow atm.} = I_{atm \rightarrow sup.terr.} + I_{atm \rightarrow espacio} \quad (3)$$

A partir de las ecuaciones (1), (2) y (3) se llega a la conclusión general:

$$\underbrace{I_{sup.terr \rightarrow atm.}}_{\text{energía absorbida por la atmósfera}} = 0,8 \cdot I_{sup.terr \rightarrow} = \underbrace{I_{atm \rightarrow sup.terr.} + I_{atm \rightarrow espacio}}_{\text{energía radiada por la atmósfera}} = 2 \cdot I_{atm \rightarrow sup.terr.}$$

Y con ello:

$$I_{atm \rightarrow sup.terr.} = 0,4 \cdot I_{sup.terr \rightarrow} \quad (4)$$

Esto significa que el 40 % de la radiación emitida por la Tierra es devuelta hacia la superficie terrestre por la atmósfera. Aquí radica la diferencia fundamental entre una Tierra con atmósfera y la hipotética Tierra rocosa:

¡La superficie terrestre es irradiada por la atmósfera como una fuente adicional de radiación!

También en este caso se alcanzará el equilibrio radiativo, por lo que la superficie terrestre debe emitir de nuevo la energía adicional que ha recibido. De esta manera, se cumple:

$$\underbrace{I_{\text{sup.terr.} \rightarrow}}_{\text{energía irradiada por la superficie terrestre}} = \underbrace{I_{\text{Sol} \rightarrow \text{sup.terr.}} + I_{\text{atm.} \rightarrow \text{sup.terr.}}}_{\text{energía absorbida por la superficie terrestre}} = \underbrace{I_{\text{Sol.} \rightarrow \text{sup.terr.}} + 0,4 \cdot I_{\text{sup.terr.} \rightarrow}}_{\text{según ecuación (4)}}$$

Despejando $I_{\text{sup.terr.} \rightarrow}$:

$$I_{\text{sup.terr.} \rightarrow} = \frac{1}{1 - 0,4} \cdot I_{\text{Sol.} \rightarrow \text{sup.terr.}} = \frac{1}{1 - 0,4} \cdot 238 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 397 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Se restablece el equilibrio de radiación: La superficie terrestre absorbe y emite la misma intensidad de radiación. Lo mismo ocurre por encima de la atmósfera. ¡Esto puede ser verificado en la figura 17!

Sin embargo, el resultado puede parecer sorprendente, ya que la superficie terrestre emite más energía (397 W/m^2) de la que recibe directamente del Sol (238 W/m^2). Esto se debe al efecto de la atmósfera: la energía solar se almacena indirectamente en la superficie terrestre y luego, impulsada también por el Sol, se intercambia constantemente. La atmósfera continúa acumulando energía (y el sistema Tierra-atmósfera se calienta cada vez más) hasta que se alcanza el equilibrio radiativo. Esto es comparable a empujar un vagón de carga en una vía circular: mientras las pérdidas por fricción no consuman toda la fuerza del empuje, los vagones se moverán cada vez más rápido, es decir, su energía cinética seguirá aumentando.

Para irradiar ahora con mayor intensidad, la superficie terrestre solo tiene una opción: ¡un aumento de la temperatura! Según la ley de Stephan-Boltzmann (ver p. 16), la temperatura de la superficie terrestre será:

$$T = \sqrt[4]{\frac{397 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}}{5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}}} = 289 \text{ K} = \mathbf{15,8^\circ \text{C}}$$

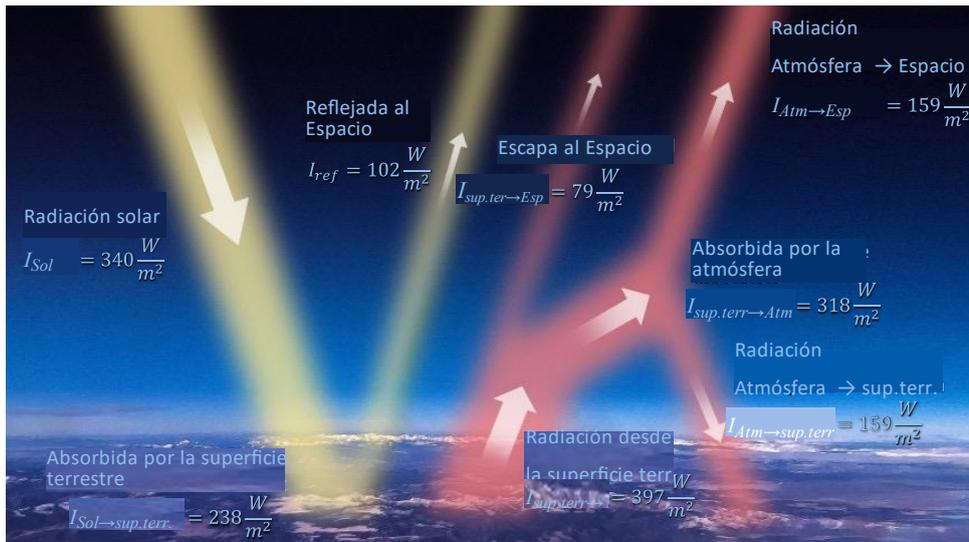


Figura 17 - Modelo de radiación con atmósfera (Créditos: Strähle y Hohmann)

Actividad 4

En comparación con la Tierra rocosa, una atmósfera que absorbe el 80 % de la radiación térmica terrestre provoca, según nuestro modelo radiativo simplificado, una radiación de retorno que calienta la Tierra en casi 34 °C. Este proceso se conoce como *efecto invernadero*, que influye notablemente en el clima y sin el cual probablemente no sería posible la vida en la Tierra.

Y ahora entra en juego el ser humano: la temperatura de la Tierra depende de la habilidad de la atmósfera para absorber (y reflejar de nuevo) la radiación térmica en el rango infrarrojo emitida por la superficie terrestre. ¿Qué pasaría si el ser humano aumenta esta capacidad de absorción?

Supongamos que la concentración de CO₂ en la atmósfera ha aumentado debido a la emisión de gases de escape y que ahora absorbe el 85 % de la radiación térmica de la Tierra (en lugar del 80 % supuesto anteriormente). Según el razonamiento anterior, $\frac{85\%}{2} = 42,5\%$ de la radiación térmica absorbida por la atmósfera es reflejada de nuevo a la Tierra. Esto da como resultado:

$$I_{sup.terr} \rightarrow = \frac{1}{1 - 0,425} \cdot I_{Sol \rightarrow sup.terr} = \frac{1}{1 - 0,425} \cdot 238 \frac{W}{m^2} = 414 \frac{W}{m^2}$$

de donde obtenemos, para la temperatura de la superficie terrestre:

$$T = \sqrt[4]{\frac{414 \frac{W}{m^2}}{5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}}} = 292 \text{ K} = 19^\circ \text{ C}$$

!Un aumento de la temperatura de 3 °C!

Este sencillo modelo de radiación puede mejorarse de forma gradual, considerando, por ejemplo, la absorción de la radiación solar por la atmósfera, tal y como ocurre con la capa de ozono en nuestra atmósfera. También se podrían tener en cuenta el efecto de las nubes, el vapor de agua y los aerosoles (como partículas de polvo) presentes en el aire, incorporar factores como la evaporación y la convección, y simular un perfil de temperatura (donde la absorción de la radiación varíe según la altura). Todo esto es considerado por los científicos del clima en sus complejos modelos climáticos, para representar con precisión la dinámica de la atmósfera mediante simulaciones a gran escala. No obstante, por mucho que mejoremos nuestro modelo, las correlaciones descritas anteriormente siguen siendo indiscutiblemente válidas:

¡Cuanta más radiación térmica de la superficie terrestre absorbe nuestra atmósfera, más calor hace en la Tierra!

La capacidad de absorción de la atmósfera es, por tanto, el tornillo de ajuste en el que se esconde todo el problema del cambio climático. ¡Y la humanidad está girando este tornillo de ajuste a una velocidad vertiginosa!

La figura 18 muestra los flujos de energía reales en la atmósfera compleja, que se derivan de mediciones globales a largo plazo y de un modelo atmosférico relativamente complejo [4]. Aquí, la superficie terrestre irradia $I_{\text{sup.terr.} \rightarrow} = 396 \text{ W/m}^2$, lo que corresponde a una temperatura media de $16 \text{ }^\circ\text{C}$. A diferencia del modelo utilizado anteriormente, la atmósfera absorbe directamente aproximadamente el 20 % de la radiación solar incidente. Además, la superficie terrestre emite energía no solo en forma de radiación térmica, sino también a través de la evaporación del agua (calor latente) y las corrientes de aire (convección). Casi el 90% de la radiación térmica procedente de la superficie terrestre es absorbida por la atmósfera. Este modelo también tiene en cuenta el hecho de que la temperatura real del aire disminuye bruscamente al aumentar la altitud, lo cual significa que la atmósfera inferior emite más radiación. De hecho, el 66 % de la retrodispersión proviene de alturas de unos 100 metros. Las nubes bajas constituyen un excelente manto térmico.

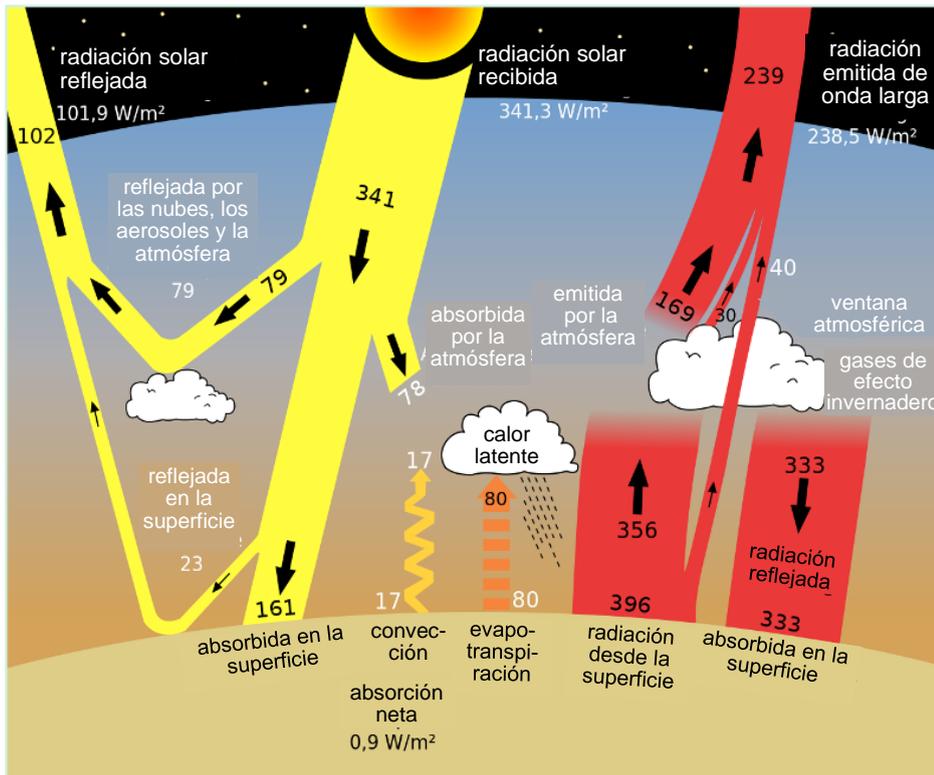


Figura 18 - Flujos de energía en la atmósfera compleja. Los balances por encima de la atmósfera y por encima del suelo están equilibrados (Créditos: Keihl y Trenberth)

Excurso: El papel de las nubes en el balance de radiación de la Tierra

PROF. BERNHARD MAYER - INSTITUTO METEOROLÓGICO DE LA LMU MÚNICH

Las nubes juegan un papel muy importante en el clima. A partir de observaciones satelitales, sabemos que las nubes reflejan parte de la radiación solar incidente (50 W/m^2) de vuelta al espacio, enfriando así la Tierra y la atmósfera. Por otro lado, al igual que el CO_2 , contribuyen al efecto invernadero natural, ya que retienen parte de la radiación infrarroja dentro del sistema (30 W/m^2). El efecto de enfriamiento domina, pero esto depende en gran medida del tipo de nube: en el caso de las nubes bajas de tipo estratocúmulo, por ejemplo, la componente de enfriamiento predomina, mientras que en las nubes altas de tipo cirro, las componentes de enfriamiento y calentamiento se compensan en gran medida. Esto hace que la investigación del papel de las nubes sea aún más apasionante, ya que si las nubes refuerzan o mitigan el cambio climático antropogénico, es decir, si representan una retroalimentación positiva o negativa, depende en gran medida de cómo reaccione la nubosidad ante un aumento de la temperatura: ¿Habrán más o menos nubes altas o bajas? ¿Cambiará el grado de nubosidad o el contenido de agua de las nubes? ¿Qué ocurrirá con el tamaño de las gotas y la formación de precipitaciones, que a su vez están influenciadas por el número igualmente variable de partículas (aerosol) en la atmósfera? Para hacer las cosas más complicadas, las nubes son extremadamente variables. A diferencia de una molécula de CO_2 , que -una vez emitida a la atmósfera- permanece allí durante cientos de años y contribuye a aumentar la concentración, las nubes se forman y desaparecen cada minuto y cambian en pocos metros. Por lo tanto, las nubes caen literalmente fuera de los modelos climáticos. Esto significa que la resolución espacial y temporal de los modelos climáticos dista mucho de ser suficiente para representar las nubes y su interacción con la radiación.

Esto solo es posible en forma de parametrización: al igual que la ecuación general de los gases es una parametrización de 10^{23} moléculas cuyas complejas propiedades están perfectamente representadas por solo tres variables macroscópicas: presión, volumen y temperatura, las nubes también deben describirse aproximadamente mediante unos pocos parámetros, lo cual desafortunadamente no funciona bien en la realidad debido a la diversidad de las nubes. Así que, mientras un único número (la concentración media global) es esencialmente suficiente para la descripción cuantitativa del CO_2 debido a su larga vida útil, las nubes son mucho más diversas y fascinantes. No es sorprendente, por lo tanto, que el impacto climático de las nubes sea la mayor incertidumbre en las predicciones climáticas. De hecho, aún no está claro si las nubes amplifican o mitigan el efecto invernadero antropogénico. Lo que está claro es que no pueden compensarlo totalmente, porque si fuera así, no habríamos observado un aumento de la temperatura en las últimas décadas.



Figura 19 - Nubes en el Atlántico tropical, desde el avión de investigación HALO. (Créditos: Prof. Bernhard Mayer)

La investigación de las nubes es uno de los temas centrales del Instituto de Meteorología de la LMU. En la azotea de la universidad combinamos experimentalmente varios sensores para la detección remota de nubes: con un radar de nubes, un radiómetro de microondas y un lidar, la LMU forma parte de la red europea de medición ACTRIS. Participamos regularmente en campañas internacionales de mediciones aéreas, como EUREC4A (Elucidating the role of clouds-circulation coupling in climate) en enero de 2020, en el Atlántico tropical, donde las observaciones de cuatro aviones de investigación, cuatro buques de investigación oceánicos y la teledetección terrestre en el Observatorio de Nubes de Barbados del MPI de Hamburgo se combinan con modernos modelos climáticos de alta resolución. Estas campañas de medición investigan, por ejemplo, cómo reaccionan las nubes a los cambios de temperatura de la superficie oceánica o cómo afectan a la dinámica de la atmósfera. Parte de la instrumentación del avión de investigación HALO es el sensor "specMACS" desarrollado en la LMU, un tipo de cámara de alta gama que toma imágenes espaciales y espectrales de alta resolución de la estructura de las nubes y proporciona así información sobre la geometría, la microfísica y la evolución temporal de la formación de las nubes. Para interpretar los datos, estamos desarrollando modelos tridimensionales de transferencia radiativa que calculan con mayor precisión la interacción de la radiación y las nubes lo que hace posible la interpretación de los nuevos métodos de teledetección de alta resolución. En el plano teórico, también trabajamos en la mejora de la inclusión de las nubes en los modelos meteorológicos y climáticos, así como en el estudio de la interacción entre las partículas de aerosoles y las nubes.

2.5. ¿Qué es un gas de efecto invernadero?

En la realidad, el efecto invernadero natural descrito anteriormente garantiza que la temperatura media global de la Tierra aumente de -18 °C a unos 14 °C [5]. A esta temperatura, el agua es líquida y, por tanto, es posible la vida en la Tierra.

La composición química de la atmósfera desempeña un papel fundamental en el efecto invernadero. En el caso de la Tierra, los componentes principales nitrógeno (78,1 vol.%⁵), oxígeno (20,9 vol.%) y argón (0,93 vol.%) no son relevantes, ya que no absorben la radiación térmica del suelo. En cambio, los gases traza que se encuentran en pequeñas cantidades, como el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano y el óxido nítrico, tienen esta capacidad y pueden absorber energía de la radiación térmica.

Como se muestra en la figura 20, a modo de ejemplo muy simplificado, estas moléculas son excitadas por la radiación incidente y convierten la energía radiante en energía vibracional. Al cabo de un tiempo, las moléculas vuelven a emitir esta energía vibracional en una dirección aleatoria. De este modo, la radiación infrarroja se emite tanto hacia el espacio exterior como hacia la superficie terrestre.

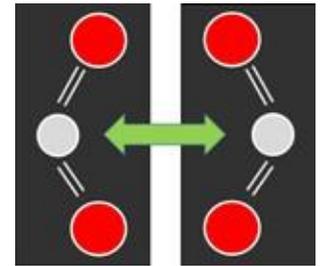


Figura 20 - Vibración de flexión de una molécula de CO_2
(Fuente Scorza/LMU)

Excursión de física cuántica: ¿Cómo lo hacen las moléculas?

Los átomos y las moléculas pueden absorber energía cambiando su estado mecánico cuántico. En el caso de los átomos, esta absorción de energía se produce excitando los electrones de la corteza atómica; mientras que en las moléculas esto puede ocurrir además mediante un cambio en el estado vibracional o rotacional. Las ondas electromagnéticas en el rango de longitud de onda visible excitan los electrones de la corteza atómica, la luz en el rango superior de microondas excita la rotación de las moléculas. La radiación infrarroja, de longitud de onda algo más corta, excita las transiciones vibracionales de las moléculas.

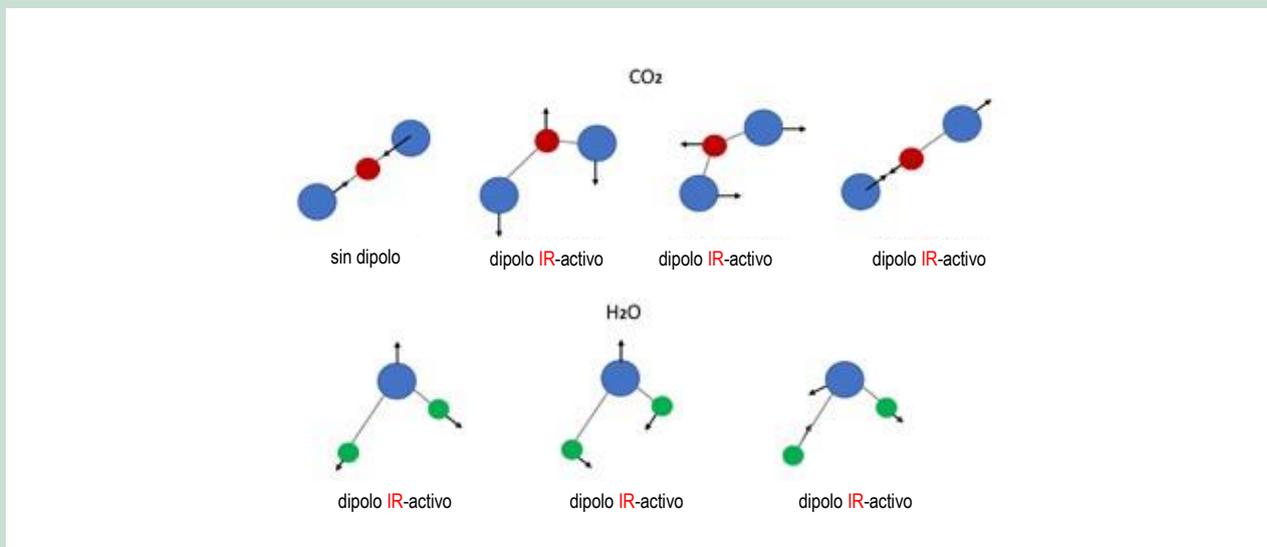


Figura 21 - Moléculas dipolares IR-activas (Créditos: Scorza)

5 En porcentaje en volumen (vol.%) se indican las proporciones en volumen, a diferencia, por ejemplo, del porcentaje en masa.

Sin embargo, esta absorción de radiación infrarroja solo puede producirse si el momento dipolar eléctrico⁶, que actúa como "palanca" de la radiación entrante, cambia durante la oscilación. Las vibraciones moleculares con esta propiedad se denominan IR-activas. Todas las vibraciones moleculares simétricas en las que el centro de carga no se desplaza son, por tanto, IR-inactivas.

Las moléculas dipolares tienen un momento dipolar constante ya que los electrones no están distribuidos simétricamente. Un ejemplo de ello es la molécula de agua (ver Figura 21, fila inferior). Aquí, además de los enlaces polares H-O, dos pares de electrones libres refuerzan el momento dipolar permanente y todas las transiciones vibracionales y rotacionales son IR-activas.

Por el contrario, la molécula simétrica de CO₂ no tiene un momento dipolar constante, ya que los átomos están dispuestos de manera lineal y los centros de carga de las cargas positivas y negativas coinciden. Sin embargo, las vibraciones de flexión de la molécula de dióxido de carbono hacen que se rompa esta simetría (ver figura 21, fila superior). Los momentos dipolares resultantes hacen que el CO₂ absorba radiación infrarroja y pueda actuar como gas de efecto invernadero.

6 Una molécula tiene un momento dipolar eléctrico cuando los centros de carga positiva y negativa no coincide.

Capítulo 3

El sistema climático de la Tierra

3.1. Diferencia entre tiempo y clima

Para entender cómo influye la actividad humana en el clima, primero necesitamos una visión general básica del sistema climático de la Tierra. Es esencial distinguir claramente entre los términos clima y tiempo atmosférico:

El estado actual de la atmósfera terrestre en un momento y lugar determinados se denomina *tiempo* (o *tiempo atmosférico*). El tiempo tiene lugar en escalas temporales que van de horas a días, es decir, en períodos de tiempo relativamente cortos (ver Tabla 1) y viene determinado, por ejemplo, por la radiación solar, las zonas de alta y baja presión, la convección y las precipitaciones. El *tiempo* es el término utilizado para describir el patrón meteorológico a lo largo de varias semanas.

El *clima*, por su parte, se refiere al comportamiento meteorológico promediado a lo largo de muchos años en un lugar determinado ("promedio del tiempo"), generalmente durante un período de al menos 30 años hasta varios miles de años. Por lo tanto, las fluctuaciones o anomalías a corto plazo no son determinantes.

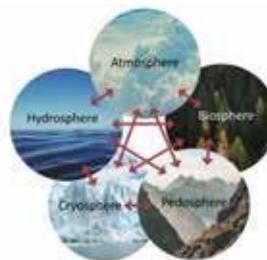
Fenómeno	Escala de tiempo	Ejemplos
Microturbulencia	Segundos - Minutos	Tormenta de polvo, ráfaga de viento, onda de calor
Tiempo	Horas - Días	Área de baja presión, tormenta tropical, nubes de buen tiempo
Condiciones meteorológicas	Semanas - Meses	Invierno frío
Clima	años 12.500 años 200 años 100 años	Clima óptimo del Holoceno Pequeña Edad de Hielo (principios del Holoceno) Retroceso de los glaciares en el Siglo XX

Cuadro 1 - Diferencia entre tiempo, condiciones meteorológicas y clima (Créditos: Scorza)

3.2. El sistema climático de la Tierra y sus componentes

El clima de la Tierra está determinado principalmente por la radiación solar que llega a la superficie terrestre y por las interacciones entre los *principales componentes del sistema climático*. Estos son:

- Hidrosfera (agua)
- Atmósfera (aire)
- Criosfera (hielo)
- Pedosfera (suelos)
- Biosfera (seres vivos)



Estos componentes tienen diferentes velocidades de reacción a los cambios y, por tanto, determinan de forma significativa la dinámica del sistema climático. A continuación examinaremos brevemente cada uno de ellos:

Actividad 8

EL PAPEL DE LOS OCÉANOS (HIDROSFERA) EN LA MODERACIÓN CLIMÁTICA

Los océanos desempeñan un papel clave en el sistema climático de la Tierra. Cubren alrededor de 2/3 de la superficie terrestre y absorben gran parte de la radiación solar incidente.

Desde un punto de vista físico, el agua es un acumulador de calor muy eficaz. Una determinada masa de agua puede absorber mucha más energía térmica con el mismo aumento de temperatura que, por ejemplo, la misma masa de aire. El término físico clave en este contexto es la *capacidad calorífica*. Es diferente para cada sustancia e indica cuánta energía se necesita para calentar un kilogramo de una sustancia en un Kelvin. El agua, por ejemplo, necesita 4,183 kJ de energía térmica, por lo que tiene una capacidad calorífica específica de $c_{\text{agua}} = 4,183 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$. El aire, por otro lado, tiene un calor específico significativamente inferior de $c_{\text{aire}} = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$ ⁷.

La relación entre el aporte de energía ΔQ , la masa m y el aumento de temperatura ΔT , está dada por:

$$\Delta Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

La diferencia de capacidad calorífica permite que nuestros océanos amortigüen significativamente la energía introducida por el efecto invernadero antropogénico. Esto se hace evidente en el siguiente sencillo modelo:

7 Los valores se dan en condiciones estándar, en el caso de aire con un 0 % de humedad.

Dos bloques, cada uno lleno con 1 kg de aire, deben ser calentados en $\Delta T = 1 \text{ K}$ mediante la adición de energía. Según la fórmula anterior, se necesita una cantidad de energía de

$$\Delta Q = c_{\text{aire}} \cdot 2 \text{ kg} \cdot 1 \text{ K} = 2,01 \text{ kJ.}$$

Si sustituimos uno de los bloques por un bloque lleno de agua (también de 1 kg), obtenemos un modelo muy simple del sistema atmósfera-océano. Para calentar este sistema 1 K, se necesita mucha más energía:

$$\Delta Q = c_{\text{aire}} \cdot 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ K} + c_{\text{agua}} \cdot 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ K} = 5,19 \text{ kJ}$$

Visto de otra manera: Si se añade a este sistema la cantidad de energía de 2,01 kJ del primer modelo, ¡la atmósfera y el agua solo se calientan unos 0,4 K!

En total, ¡alrededor del 93 % de la energía adicional introducida en el sistema climático de la Tierra por el efecto invernadero antropogénico se almacena en nuestros océanos! Sin embargo, los océanos no solo extraen energía térmica de la atmósfera, sino también CO_2 , que se disuelve en el agua. Los océanos amortiguan así doblemente el efecto invernadero antropogénico, pero no sin consecuencias, como veremos más adelante.

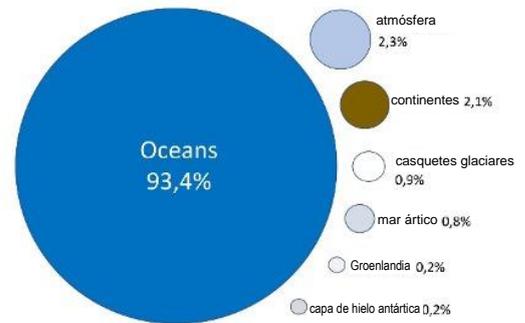


Figura 22 - Almacenamiento de calor en el sistema terrestre (Créditos: Scorza)

LA ATMÓSFERA CAMBIANTE

La atmósfera es el componente más inestable del sistema climático. En particular, su capa más baja, la troposfera, es un lugar de fenómenos meteorológicos muy cambiantes. Aquí las diferencias de temperatura se igualan rápidamente y el choque de masas de aire puede provocar reacciones meteorológicas violentas, como tormentas, trombas y fuertes precipitaciones.

Gracias a su capacidad para absorber la radiación térmica de onda larga, la atmósfera garantiza temperaturas agradables en la Tierra (ver "El papel de la atmósfera y el efecto invernadero" en la página 18). Desafortunadamente, desde la industrialización, se utiliza cada vez más como vertedero de residuos gaseosos, lo que provoca el efecto invernadero entre otros problemas (por ejemplo, agujero en la capa de ozono, contaminación por partículas, etc.).

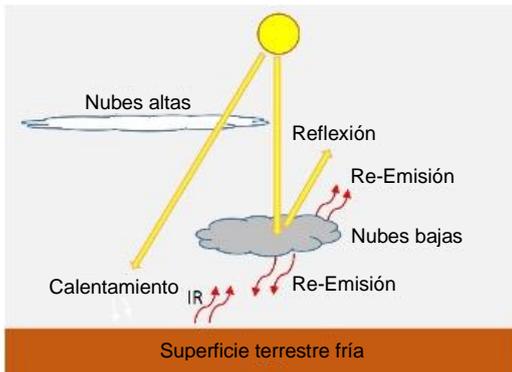


Figura 23 - Efecto de las nubes altas y bajas (Créditos: Scorza)

Adicionalmente, cuando se enfría el vapor de agua se forman nubes en la atmósfera. Estas pueden influir fuertemente en la permeabilidad de la radiación solar y de la radiación térmica de la superficie terrestre a nivel local. Son, por tanto, un factor decisivo en el sistema climático. Se distinguen distintos tipos: Los cirros altos que son casi totalmente permeables a la radiación solar, y los estratos bajos y densos, los cuales reflejan la radiación solar durante el día y tienen un efecto de enfriamiento. Por la noche, en cambio, devuelven la radiación térmica a la superficie terrestre y tienen un efecto de calentamiento.

Por ejemplo, una capa de nubes bajas en una noche de invierno impide que la radiación térmica escape al espacio. En comparación con una noche invernal estrellada y sin nubes, la temperatura se mantiene significativamente más cálida.

EL PAPEL DE LA CRIOSFERA EN EL BALANCE DE RADIACIÓN

Las superficies de hielo y nieve desempeñan un papel importante en el balance de radiación de la Tierra, ya que ambas tienen una reflectividad (albedo) mucho mayor que el suelo y el agua. Mientras que los océanos y el suelo tienen un albedo del 10-20% y, en consecuencia, absorben hasta el 90 % de los rayos solares y los convierten en radiación térmica, el albedo del hielo y la nieve es del 50-90 %.

Actividad 2



Figura 24 - Experimento del modelo sobre el albedo a partir del maletín climático. El cuerpo oscuro se calienta más con la misma iluminación.

El albedo global aumenta a medida que crece la capa de hielo y nieve de la Tierra. Debido a la mayor reflexión, la Tierra absorbe menos energía. El enfriamiento resultante aumenta aún más la formación de hielo y nieve, lo que a su vez incrementa el albedo. Geólogos e investigadores del clima debaten actualmente si nuestro planeta ha experimentado fases de glaciación completa a lo largo de su historia, como se supone que ocurrió según la hipótesis de la "Tierra bola de nieve" hace unos 750 a 600 millones de años. Se supone que el vulcanismo terrestre, con las masas de CO₂ emitidas y la consiguiente intensificación del efecto invernadero, liberó a la Tierra de su coraza de hielo.

Por supuesto, este efecto de retroalimentación también puede funcionar en sentido contrario: El deshielo de las superficies de hielo y nieve reduce la reflexión y, por tanto, aumenta el calentamiento del suelo, el aire y el agua de la Tierra, lo que acelera aún más el proceso de deshielo. Por tanto, el tamaño de las superficies de hielo y nieve de un planeta tiene un gran impacto en su clima.

LA PEDOSFERA Y LA LITOSFERA EN EL SISTEMA CLIMÁTICO

Ya hemos explicado que el intercambio de energía entre el suelo y la atmósfera se produce a través de la emisión de radiación térmica. Otra forma de transferencia de energía, el calor latente, se produce a través de la evaporación del agua cerca del suelo: durante la evaporación del agua se extrae energía del suelo y del aire circundantes. Esta energía se transfiere a la atmósfera en forma de vapor de agua y se libera nuevamente al condensarse. Si el suelo está relativamente seco, se libera menos calor latente a la atmósfera. La menor evaporación significa que puede escapar menos energía, lo que conduce a una mayor temperatura del suelo. Como también entra menos vapor de agua en la atmósfera, se forman menos nubes y aumenta la radiación sobre el suelo: el suelo se calienta aún más y se vuelve más seco y comienza un lazo de retroalimentación positiva.

EL PAPEL DE LA BIOSFERA

La influencia de la biosfera en el clima viene determinada por el intercambio de gases con la atmósfera, especialmente a través del ciclo del dióxido de carbono. Originalmente, la atmósfera de la Tierra estaba formada principalmente por dióxido de carbono, nitrógeno, metano y vapor de agua. Las algas primitivas de los océanos primitivos añadieron oxígeno mediante la fotosíntesis, lo que permitió la aparición de formas de vida más complejas.

Aún hoy, la importancia climática de la biosfera radica sobre todo en su influencia en la composición química de la atmósfera y, por tanto, en la intensidad del efecto invernadero: las plantas extraen constantemente dióxido de carbono de la atmósfera mediante la fotosíntesis. La concentración de metano y óxido nitroso, los cuales también actúan como gases de efecto invernadero en la atmósfera, igualmente está controlada en parte por procesos de la biosfera. El gas de efecto invernadero metano se produce de forma natural, principalmente a través de la descomposición anaeróbica de la materia orgánica (por ejemplo, en el estómago de una vaca) mientras que la formación de óxido nitroso está fuertemente influenciada por la actividad de las bacterias en el suelo y en las masas de agua. Adicionalmente, la cubierta vegetal de la superficie terrestre aumenta el albedo.

Excurso: Sistemas de circulación atmosférica y cambio climático

PROF. THOMAS BIRNER - INSTITUTO METEOROLÓGICO DE LA LMU MÚNICH

El calentamiento global es consecuencia, en primer lugar, del cambio en el balance energético de la atmósfera terrestre en su conjunto, provocado por el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (ver sección 2.4). Sin embargo, la medida en que cambia la redistribución de la energía disponible en la atmósfera terrestre también es decisiva para el cambio climático regional. Esta redistribución está directamente relacionada con los sistemas de circulación atmosférica -por ejemplo, las zonas de baja y alta presión- que es muy variable en algunas regiones. Por otra parte, todavía existen lagunas en nuestra comprensión fundamental de los cambios climáticos impulsados por la circulación. Esto motiva no solo a una mejora de los modelos climáticos por ordenador para obtener mejores pronósticos a largo plazo, sino también más investigación básica. Nuestro grupo en el Instituto Meteorológico de la Facultad de Física de la LMU se ocupa de la "Dinámica Estratosfera-Troposfera y Clima" y trabaja para mejorar la comprensión fundamental de la variabilidad y el cambio a largo plazo de los sistemas de circulación a gran escala.

¿Por qué existen sistemas de circulación a gran escala?

Entre los trópicos y las latitudes más altas existe generalmente un desequilibrio energético: en los trópicos se absorbe más energía solar de la que el sistema terrestre irradia nuevamente al espacio, lo que genera un excedente de energía; en las latitudes altas, se irradia más energía al espacio de la que se recibe del Sol, lo que genera un déficit energético. Este desequilibrio energético entre los trópicos y las latitudes más altas genera un transporte de calor, el cual se manifiesta en forma de sistemas de circulación a gran escala. En este sentido, la atmósfera funciona como una gigantesca máquina térmica, y los sistemas de circulación tienden constantemente a reducir la diferencia de temperatura entre los trópicos y las latitudes más altas, equilibrando así el desbalance energético.

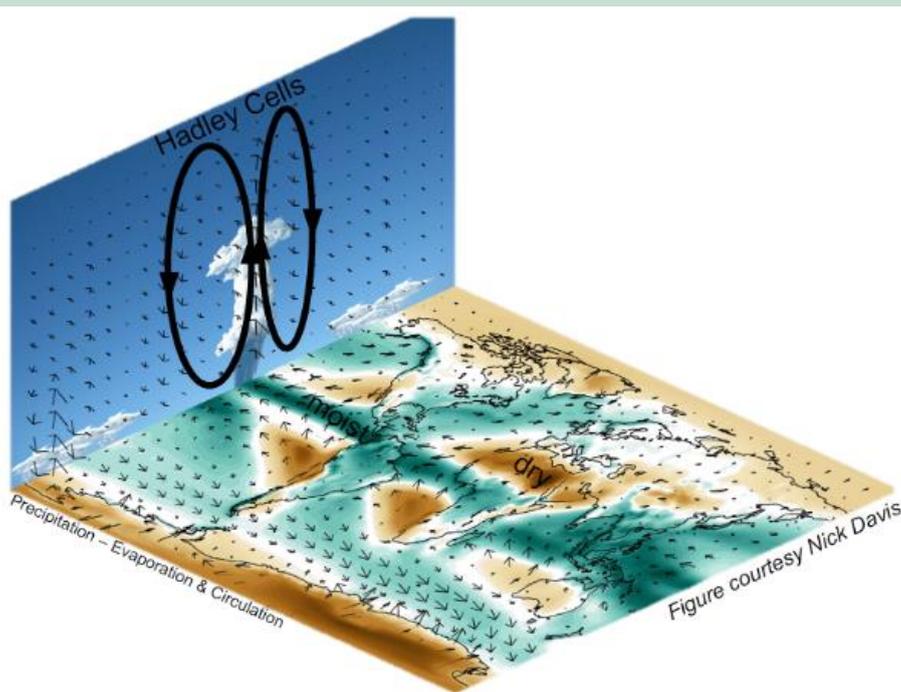


Figura 25 - Ilustración de la circulación Hadley (Créditos: Nick Davis)

En los trópicos y subtrópicos, esta redistribución de la energía tiene lugar en forma de la llamada circulación de Hadley. En la circulación de Hadley, el aire cálido y húmedo asciende cerca del ecuador dentro de tormentas de alta presión, fluye lentamente hacia los polos a una altitud de cercana a 15 km, se hunde como aire seco en los subtrópicos y vuelve a fluir hacia el ecuador cerca del suelo. En el proceso, el flujo a gran altitud es desviado hacia el este por el efecto Coriolis y genera así corrientes en chorro subtropicales. Del mismo modo, el flujo cerca del suelo se desvía hacia el oeste, creando los vientos alisios. El aire seco, que se hunde en los subtrópicos impide la formación de nubes y la lluvia, por lo que es responsable, entre otras cosas, de las zonas secas típicas de esta zona climática. Una señal del cambio climático, cada vez más documentada en los últimos años, es la expansión hacia los polos de la circulación de Hadley y, por tanto, el desplazamiento de las zonas secas subtropicales hacia las latitudes medias. Para regiones en las que hasta ahora llovía apenas lo suficiente, por ejemplo para poder cultivar, el cambio asociado hacia un clima predominantemente seco tiene consecuencias dramáticas.

Entre otras cosas, nuestro grupo investiga en qué medida la circulación de Hadley varía de un año a otro y qué procesos son responsables de esta variabilidad. Esto nos permite sacar conclusiones sobre los mecanismos que determinan la localización típica de las zonas secas subtropicales. Para estas investigaciones utilizamos principalmente datos procedentes de cálculos globales, con modernos modelos informáticos de previsión meteorológica, que se combinan con datos observacionales. Los llamados reanálisis son actualmente la mejor fuente de información sobre el estado real de la atmósfera y las corrientes que contiene con cobertura global. Incluyen información sobre la temperatura, las componentes del viento, la humedad y otras variables meteorológicas y están disponibles en alta calidad y cobertura global desde la llamada era de los satélites (desde 1979). Utilizamos métodos estadísticos modernos para analizar estos datos, por ejemplo, para encontrar patrones dominantes de variabilidad.

También investigamos los mecanismos de expansión de la circulación de Hadley a lo largo de períodos climáticos utilizando modelos climáticos informáticos globales simplificados. Algunos procesos se omiten deliberadamente para poder analizar los posibles mecanismos de forma aislada. Utilizando tales simulaciones de modelos informáticos, hemos comprobado, por ejemplo, que la interacción de las zonas de altas y bajas presiones, que a veces se desplazan desde las latitudes medias hacia los subtrópicos, con la circulación de Hadley desempeña un papel decisivo en la expansión hacia los polos de la circulación de Hadley provocada por el cambio climático.

Las mencionadas altas y bajas presiones son responsables del transporte de calor hacia los polos en latitudes más altas (por ejemplo, en el caso de una zona de bajas presiones en el hemisferio norte -vista desde el espacio como una circulación giratoria en sentido antihorario- el aire frío polar fluye hacia el sur por su lado occidental y el aire cálido subtropical fluye hacia el norte por su lado oriental). Estas bajas y altas presiones suelen desplazarse a lo largo de la corriente en chorro de las latitudes medias y polares (~ corriente en chorro del frente polar), pero al mismo tiempo influyen en esta corriente en chorro por el transporte de calor inducido. Se prevé que el cambio climático provoque un desplazamiento hacia los polos de la corriente en chorro, aunque esto aún no se comprende suficientemente. Los resultados de nuestra investigación han contribuido a una mejor comprensión del acoplamiento del desplazamiento hacia los polos (circulación Hadley y corriente en chorro) como señales del cambio climático.

Otro acoplamiento, que se ha descrito cada vez más en los últimos años es el de la circulación de la estratosfera (rango de altitud ~10-50 km) en invierno y primavera. En este caso se forma el llamado vórtice polar debido al fuerte enfriamiento del casquete polar en invierno. La intensidad de este vórtice polar varía en ocasiones considerablemente y, debido a determinados procesos dinámicos, a veces puede colapsar de forma abrupta. Aunque la estratosfera tiene menos del 20 % de la masa de la atmósfera, los análisis de los datos observacionales han demostrado que las variaciones del vórtice polar estratosférico pueden influir en la circulación hasta la superficie terrestre. Esto ocurre tanto en períodos meteorológicos cortos como en períodos climáticos más largos. Sin embargo, la evolución futura del vórtice polar provocada por el cambio climático es bastante incierta, sobre todo en el hemisferio norte, que es altamente variable. Por esto, nuestro grupo investiga los mecanismos de variabilidad del vórtice polar y el acoplamiento con la circulación de la troposfera hasta la superficie terrestre. Para este propósito, usamos datos de reanálisis y simulaciones con modelos climáticos informáticos simplificados.

Actividad 7

3.3. Creación de las zonas climáticas

El término "clima" deriva de "klinein", palabra griega que significa "inclinarse". Esto se debe a que las estaciones son consecuencia de la inclinación del eje terrestre con respecto al plano orbital de la Tierra alrededor del Sol. Esta inclinación provoca que durante el verano boreal, el hemisferio norte está iluminado más verticalmente y, por tanto, más intensamente por el Sol (posición *a* en la figura 26), mientras que los rayos solares inciden de forma relativamente oblicua sobre el hemisferio sur. Seis meses más tarde, el hemisferio sur recibe una irradiación más intensa (posición *b* en la Figura 26) y el invierno domina en el hemisferio norte.

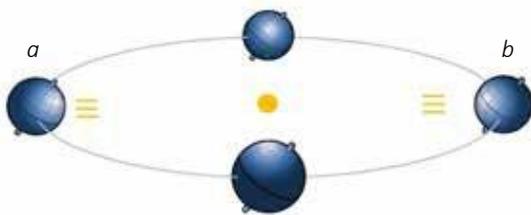


Figura 26 - Las estaciones (Créditos: Scorza)

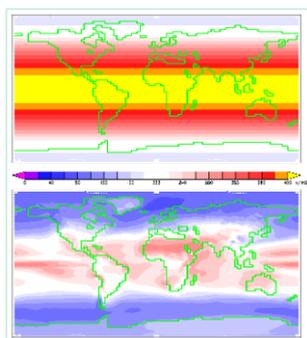


Figura 27 - Valor medio anual de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre (arriba) y en el suelo (abajo) en W/m^2 (Créditos: William M. Connolley, Wikipedia)

Una segunda consecuencia de la inclinación del eje terrestre es que la temperatura media a lo largo del año es más alta en la región cerca del ecuador y disminuye hacia los polos. Por tanto, el diferente ángulo de incidencia con el que la radiación solar llega a la superficie terrestre es también la razón por la que existen diferentes zonas climáticas en la Tierra.

Las zonas climáticas son áreas que se extienden alrededor de la Tierra en dirección este-oeste y presentan similitudes (por ejemplo, en términos de vegetación) debido a sus condiciones climáticas.

En los trópicos, por ejemplo, hace calor y hay humedad todo el año. Dependiendo de la ubicación, se pueden encontrar tanto selvas tropicales como estepas tropicales y desiertos. No hay estaciones, solo una temporada de sequía y otra de lluvia. Las fluctuaciones de temperatura en el transcurso de un día son mayores que las fluctuaciones anuales. En cambio, en la zona templada, donde se encuentra Alemania, las distintas estaciones están claramente diferenciadas. En el interior de los continentes, el clima es seco y crecen bosques de coníferas, caducifolios y bosques mixtos. En las regiones polares, el Sol incide de manera bastante oblicua durante todo el año o incluso no llega a aparecer en absoluto, por lo que la temperatura media anual es mucho más baja. La vegetación es mucho menos exuberante, compuesta principalmente por pastos y arbustos bajos. Una característica distintiva de esta zona es el día polar de tres meses en verano y la noche polar, igualmente de tres meses, en invierno.

Las zonas climáticas muestran claramente los efectos que tiene el hecho de que la superficie terrestre reciba diferentes cantidades de energía. Por ejemplo, el ángulo medio con que llega la radiación solar a la superficie de la tierra a lo largo del año influye considerablemente en la vegetación. *El flujo adicional de energía hacia la superficie terrestre provocado por el efecto invernadero antropogénico cambiará la posición de estas zonas climáticas y las desplazará desde el ecuador hacia los polos, un movimiento que la mayoría de las especies, especializadas en sus respectivos ecosistemas, no serán capaces de seguir.*

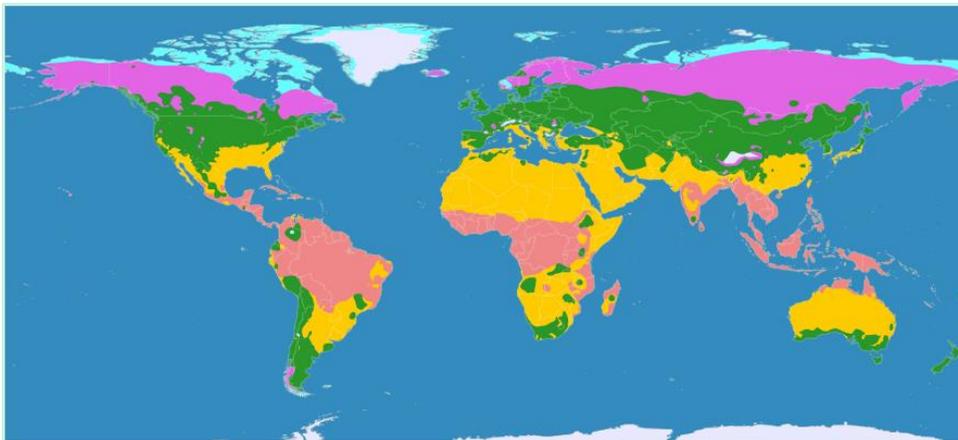


Figura 28 - Zonas climáticas de la Tierra (Fuente: LordToran - Elaboración propia a partir de estos geodatos; CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2301350>)

Excurso: Modelos meteorológicos y climáticos

Los meteorólogos obtienen la previsión del tiempo a partir de los resultados de cálculos de simulaciones por ordenador (los llamados *modelos meteorológicos*). Para ello, un ordenador de alto rendimiento calcula, a partir de un estado inicial de la atmósfera, el estado en un momento posterior, utilizando ecuaciones basadas en principios físicos. El estado inicial se obtiene a partir de numerosas observaciones de estaciones, como mediciones con boyas, barcos, aviones y globos meteorológicos, así como de datos de satélites y radares (ver Figura 29). El objetivo es poder ofrecer una previsión del tiempo local lo más exacta posible.

La dificultad de la predicción del clima reside en el hecho que la atmósfera es un sistema complejo con comportamientos parcialmente caóticos. En un sistema no caótico, pequeños cambios en las condiciones iniciales conducen a estados finales similares. En cambio, en un sistema completamente caótico, incluso un pequeño cambio en las condiciones iniciales puede conducir a estados finales completamente diferentes. Por esta razón, los cálculos de modelos como los utilizados para predecir el clima, se vuelven cada vez más inciertos a medida que aumenta el tiempo de predicción, dada la naturaleza caótica del sistema. Por esta razón, el tiempo suele ser predecible durante unos siete días en promedio.

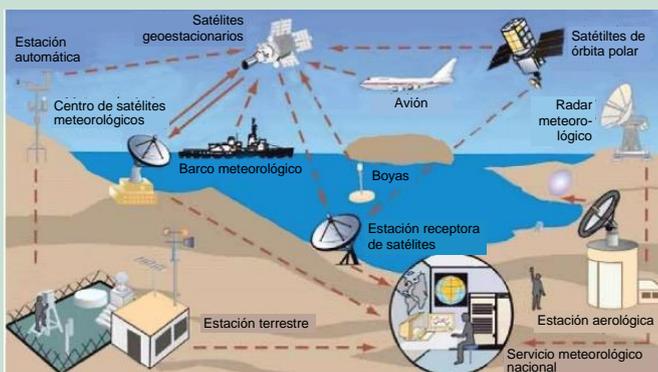


Figura 29 - El sistema mundial de observación meteorológica (Fuente: Wetterdienst.de DWD)

Los *modelos climáticos* globales son modelos físicos igualmente complejos que representan el sistema climático de la Tierra de forma simplificada. Las simulaciones climáticas calculan, mediante modelos acoplados de atmósfera y océano, la reacción del sistema a condiciones cambiantes, como cambios en la radiación solar o cambios en los flujos de energía en el sistema climático. Para ello, la atmósfera y los océanos se dividen en una malla tridimensional. El intercambio de masa y energía entre puntos adyacentes de la cuadrícula se calcula paso a paso

mediante ecuaciones diferenciales de física fundamental provenientes de la dinámica de fluidos, la hidrología y la química. De este modo, es posible analizar cómo afectará al clima futuro el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Mientras que las previsiones de un modelo meteorológico pueden comprobarse directamente mediante las observaciones, los resultados de las simulaciones climáticas solo se pueden comparar con valores meteorológicos promediados. Para comprobar si un modelo climático arroja resultados plausibles, se alimenta con datos de medición e hipótesis plausibles y luego se comprueba si puede simular correctamente el clima actual, pero también, por ejemplo, el clima durante eras glaciales pasadas. Para crear una *previsión climática*, se alimentan varios modelos climáticos con una serie de datos e hipótesis disponibles para poder predecir la evolución futura.

Capítulo 4

Cambio climático antropogénico

4.1. El efecto invernadero antropogénico

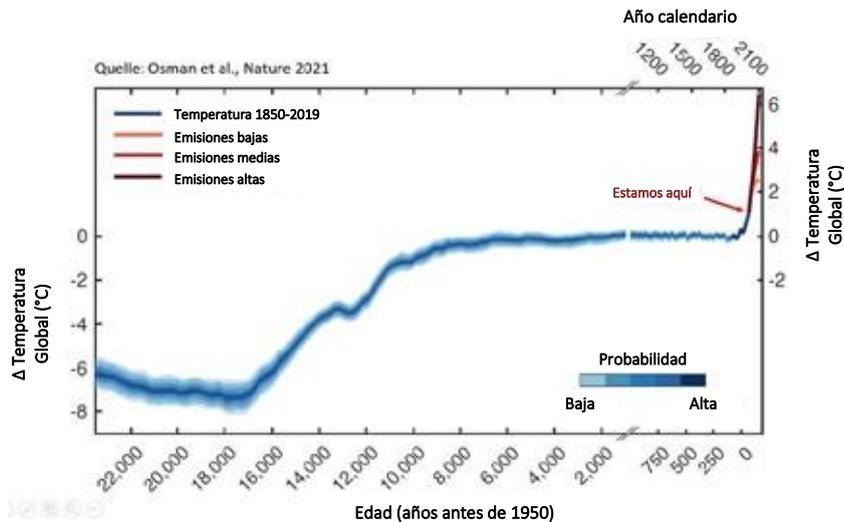


Figura 30 - El gráfico muestra la tendencia de la temperatura global desde la última glaciación, con escenarios futuros. Los últimos 2000 años tienen una mayor resolución (fuente: Osman et al., Nature 2021).

La Tierra se formó hace unos 4.600 millones de años. Durante este largo período, se han producido repetidas fluctuaciones climáticas y grandes cambios en el planeta. Desde el comienzo del Holoceno, hace unos 12.000 años y, por tanto, desde la última glaciación, nuestro clima se ha mantenido relativamente estable en comparación con períodos anteriores (ver Figura 30). Desde 1980, sin embargo, se ha observado un aumento significativo de la temperatura atmosférica media.

En la actualidad, existe un consenso en la investigación climática de que el cambio climático actual no puede explicarse sin la actividad humana:

"Entre quienes entienden los matices y la ciencia que hay detrás de los procesos climáticos a largo plazo, parece que prácticamente no hay debate sobre el hecho del calentamiento global y el papel de la actividad humana en él. El reto parece ser cómo comunicar eficazmente este hecho a los políticos y al público en general, que asumen erróneamente que se trata de un debate entre científicos."

Cita de un estudio en el que se analizaba el consenso entre los geocientíficos sobre la pregunta "¿Cree que las actividades humanas tienen una influencia decisiva en el cambio de la temperatura media mundial?". [6]

El dióxido de carbono, específicamente, desempeña un papel decisivo en el efecto invernadero antropogénico (provocado por el hombre) [7]. A lo largo de milenios, el contenido de CO₂ en la atmósfera terrestre siempre ha estado por debajo de la marca de 300 ppm⁸ (ver Figura 31). Sin embargo, desde la revolución industrial en torno a 1800, la concentración ha aumentado rápidamente en más de un 40%, pasando de unas 280 ppm a más de 400 ppm en la actualidad. Ahora es más alta que en cualquier otro momento de los últimos 400.000 años⁹.

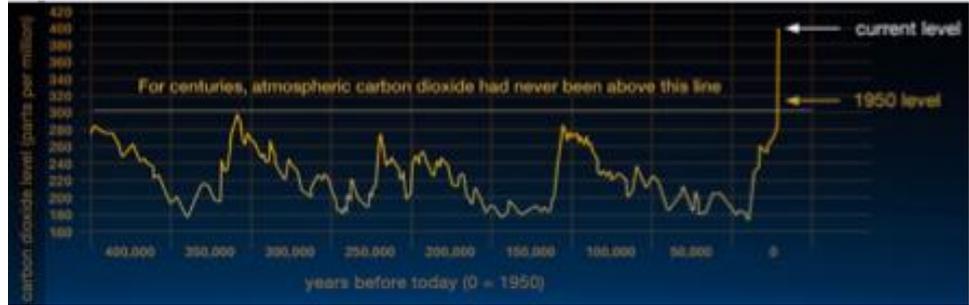


Figura 31 - Diagrama de la concentración de CO₂ en la atmósfera con datos de mediciones actuales y reconstrucciones mediante núcleos de hielo (fuente: NASA - Global Climate Change; climate.nasa.gov/evidence/ consultado el 20/01/2020)

La razón principal es que los seres humanos queman combustibles fósiles ricos en carbono para producir energía utilizable, liberando dióxido de carbono en el proceso cuando se adiciona oxígeno. Al principio, esto ocurría principalmente en Europa y América del Norte, más tarde también en Rusia, China, India y Brasil. En las últimas cuatro generaciones, las emisiones anuales de CO₂ han pasado de 2 gigatoneladas en 1900 a 37,1 gigatoneladas en 2017, el nivel más alto jamás registrado [8].



Figura 32 - Emisiones mundiales de dióxido de carbono en 2015 (Créditos: Agencia Internacional de la Energía, Agencia Europea de Medio Ambiente)

- 8 ppm significa partes por millón, es decir, el número de moléculas de CO₂ por cada millón de moléculas de aire seco.
- 9 ¿Cómo podemos saberlo? Se extrajeron núcleos de perforación del hielo antártico de cientos de miles de años de antigüedad a más de 3 kilómetros de profundidad. A partir de las burbujas de aire que contienen, se pueden extraer conclusiones sobre la composición de la atmósfera en distintas épocas de la historia de la Tierra.

La figura 33 muestra el aumento global de la concentración de dióxido de carbono en los últimos 150 años aproximadamente. La objeción planteada a menudo por los escépticos del cambio climático antropogénico, de que las fluctuaciones de las manchas solares, con su aumento de los valores de radiación, son responsables del aumento medible de la temperatura en las últimas cuatro décadas, puede contradecirse claramente. La actividad solar está disminuyendo, mientras que la temperatura y el contenido de dióxido de carbono de la atmósfera están aumentando. La actividad solar y el calentamiento global están desacoplados, incluso evolucionan en direcciones opuestas.

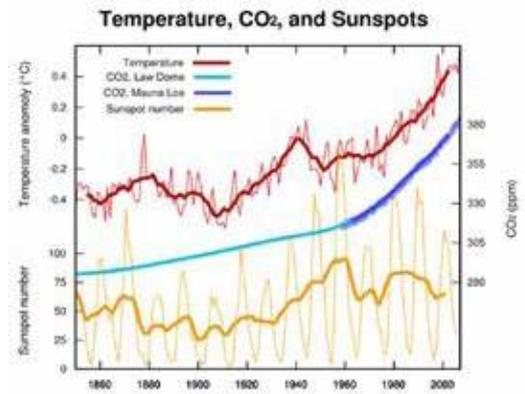


Figura 33 - Aumento de la temperatura y del CO₂ (fuente: <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Temp-sunspot-co2.svg>, consultado el 1 de julio de 2021)

El *metano* (CH₄) también desempeña un papel decisivo en el aumento del efecto invernadero. Comparado con el CO₂, el metano es más eficaz como gas de efecto invernadero por un factor de aproximadamente 28 a 72 si consideramos el efecto en los próximos 100 o 20 años¹⁰. Desde la revolución industrial, la concentración de metano en la atmósfera terrestre ha pasado de unas 700 ppb¹¹ a más de 1800 ppb en la actualidad [9]. El 37 % de las emisiones mundiales de metano se atribuyen directa o indirectamente a la ganadería [10] y hoy en día el metano contribuye en torno al 16 % al efecto invernadero antropogénico [11]. Esta cifra podría aumentar drásticamente en breve debido al deshielo del permafrost en Siberia y Canadá (véase más adelante "Vapor de agua y efectos de retroalimentación"). El metano es un gas de efecto invernadero de vida corta. La mayor parte se oxida en la atmósfera en una década para formar dióxido de carbono, que calienta aún más la atmósfera durante miles de años.

Otro gas de efecto invernadero es el *óxido nítrico* (N₂O, gas de la risa), que tiene un potencial de calentamiento global aproximadamente 265 veces superior al del dióxido de carbono. La concentración de este gas en la atmósfera terrestre ha aumentado aproximadamente un 20% desde la revolución industrial y, en la actualidad, contribuye aproximadamente en un 6% al efecto invernadero antropogénico [11]. La emisión de N₂O se produce tanto de forma natural como por influencia humana: En la naturaleza, el N₂O es liberado por bacterias en el suelo y en masas de agua y bosques primigenios. Sin embargo, el ser humano contribuye a aumentar la liberación de este gas de efecto invernadero mediante el uso de fertilizantes nitrogenados, la producción industrial de productos químicos y la quema de combustibles fósiles.

10 Para comparar la nocividad de los gases de efecto invernadero emitidos durante un determinado período de tiempo, se les asigna a cada uno un equivalente de CO₂ (CO₂e), también conocido como potencial de calentamiento global. Normalmente, se supone un período de 100 años, en cuyo caso este factor es de 28 para el metano. Si, por el contrario, se supone un período de 20 años, es decir, un período en el que aún podemos evitar que el clima se desplome, el metano tiene un potencial de impacto 72 veces superior al del CO₂ [43].

11 ppb significa partes por millardo, es decir, partes por mil millones de moléculas de aire seco.

Los gases fluorados de efecto invernadero también desempeñan un papel. A diferencia de los gases mencionados anteriormente, no se producen mediante procesos naturales, sino que se desarrollaron con fines industriales. Aunque su porcentaje en el total de emisiones de gases de efecto invernadero de los países industrializados es muy bajo, no hay que subestimar su impacto debido a su largo tiempo de permanencia en la atmósfera (posiblemente varios miles de años) y a su eficacia como gas de efecto invernadero por molécula (de 12.000 a 25.000 veces mayor que la del CO₂).

Actividad 12

4.2. Procesos de retroalimentación

El aumento de la temperatura global y el cambio climático dan lugar a efectos que, a su vez, contribuyen a intensificar su causa, es decir, pueden provocar un nuevo aumento de la temperatura. Es lo que se conoce como procesos de retroalimentación. Estos son el verdadero "quid" del cambio climático. Algo ocurre y el sistema climático reacciona con cambios. Los procesos naturales en la interacción de la atmósfera, los mares y océanos, las masas de hielo y la biosfera siempre han tenido lugar, incluso en épocas en las que no había seres humanos. Dependiendo de la distribución de las masas de tierra, del vulcanismo y de diversos parámetros astronómicos, el clima cambiaba constantemente, por lo que el cambio climático es completamente natural. En las últimas décadas, sin embargo, la concentración de moléculas con capacidad para absorber la radiación térmica ha aumentado drásticamente por influencias antropogénicas. En medio de un proceso natural interconectado, con múltiples capas y, por tanto, complejo, el ser humano está modificando las condiciones iniciales y de contorno de la atmósfera mediante la extracción de recursos fósiles. El carbono, que estaba ligado a las profundidades de la Tierra hace cientos de millones de años, se lleva primero a la superficie terrestre mediante la minería del carbón y la extracción de petróleo y gas, y luego se libera a la atmósfera mediante procesos de combustión. Todos los sistemas naturales reaccionan a este cambio gradual mediante procesos de retroalimentación de forma bastante natural.

Algunos ejemplos de este tipo de retroalimentación son:

VAPOR DE AGUA EN LA ATMÓSFERA

El vapor de agua es el gas natural de efecto invernadero más potente. Sin embargo, su permanencia en la atmósfera terrestre es muy breve y suele durar solo unos días antes de volver a la Tierra en forma de lluvia. A diferencia del CO₂, el vapor de agua no es una causa directa de la intensificación del efecto invernadero inducida por el hombre; después de todo, el efecto invernadero antropogénico no está causado por el aumento de la emisión de vapor de agua. Sin embargo, debido al calentamiento global, se evapora más agua y cuanto más calor hace mayor es la capacidad de absorción de vapor

de agua en el aire.¹² Una mayor concentración de vapor de agua en la atmósfera aumenta el efecto invernadero, lo que a su vez provoca un mayor calentamiento global y así sucesivamente [7].

ALBEDO REDUCIDO

El calentamiento global está provocando el deshielo de la superficie terrestre, por ejemplo en el océano Ártico. La luz solar ya no es reflejada al espacio por la nieve resplandeciente, sino que se pierde en las profundidades de los mares polares o calienta el oscuro subsuelo expuesto. La energía calienta el agua o el suelo y permanece en el sistema terrestre, alimentando aún más el calentamiento global [12].

DESHIELO DE LA CAPA DE HIELO DE GROENLANDIA

En los últimos años, la pérdida de hielo en Groenlandia ha aumentado significativamente debido a la entrada de glaciares en el mar y al aumento del deshielo en verano. Como consecuencia de ello, la capa de hielo, de tres kilómetros de espesor en algunos lugares, está perdiendo altura a largo plazo. Su superficie, que actualmente se encuentra en capas de aire altas y por tanto frías, se está hundiendo y se expone a temperaturas más cálidas. Esto, a su vez, aumenta aún más el deshielo. Además, el aumento del agua de deshielo en el lecho glaciar actúa como una película lubricante, lo que acelera el deslizamiento de las masas de hielo hacia el mar. El colapso completo de la capa de hielo de Groenlandia provocaría una subida del nivel del mar de 7 metros a lo largo de siglos o miles de años y, naturalmente, también contribuiría a reducir el albedo (ver [13]).

DESERTIFICACIÓN DE LA SELVA AMAZÓNICA

La selva tropical depende de enormes cantidades de agua que se evaporan. Gran parte de las precipitaciones en la cuenca del Amazonas proviene del agua que vuelve a condensarse sobre la selva. La disminución de las precipitaciones en un clima más cálido, por un lado, o la deforestación, por otro, podrían llevar este ciclo a un límite crítico: cuanto menos agua se evapora en las zonas selváticas, más seca se vuelve la región y menos agua queda disponible para el bosque. Convertir la selva amazónica en un bosque estacional o en praderas adaptadas a la sequía también tendría un impacto fundamental en el clima de la Tierra: después de todo, alrededor de una cuarta parte del intercambio global de carbono entre la atmósfera y la biosfera tiene lugar allí. En caso de pérdida, se liberarían cantidades gigantescas de carbono previamente secuestrado en forma de CO₂, que seguiría impulsando el calentamiento global como gas de efecto invernadero (cf. [14]).

12 Este efecto puede observarse, por ejemplo, en cristales de ventanas mal aislados en invierno. Cuando el aire caliente y relativamente húmedo de la habitación se enfría cerca de la ventana, su capacidad de absorber vapor de agua disminuye y el agua se condensa en el cristal.

DECLIVE DE LOS BOSQUES DE CONÍFERAS DEL NORTE

Los bosques nórdicos de coníferas cubren casi un tercio de la superficie forestal mundial. El cambio climático ya está aumentando considerablemente la presión que ejercen sobre ellos las plagas, los incendios y las tormentas. Al mismo tiempo, la escasez de agua, el aumento de la evaporación y el uso humano están perjudicando la regeneración de los bosques. Si el estrés supera los umbrales característicos, podrían ser desplazados por matorrales y pastizales. La desaparición de los bosques no solo destruiría el hábitat de muchos animales y plantas, sino que también supondría una liberación masiva de dióxido de carbono, que puede contribuir a acelerar el calentamiento global (cf. [12]).

DESCONGELACIÓN DEL PERMAFROST

Varios cientos de miles de millones de toneladas de carbono están probablemente almacenadas a más de tres metros de profundidad en el permafrost siberiano y canadiense. Proceden de la materia orgánica que se depositó allí durante y desde la última glaciación. Cuando el permafrost se calienta, libera a la atmósfera enormes cantidades de dióxido de carbono y metano, es decir, gases de efecto invernadero (ver [12]).

ATENUACIÓN DE LA BOMBA BIOLÓGICA MARINA DE CARBONO

Los océanos del mundo absorben enormes cantidades de carbono: alrededor del 40% de las emisiones antropogénicas de CO₂ hasta la fecha se han eliminado de la atmósfera de esta manera. Gran parte de este carbono es utilizado por las algas para su crecimiento. Después de morir, se hunden en las profundidades marinas y de esta forma almacenan el carbono. Sin embargo, esta función podría verse limitada por el calentamiento y la acidificación del agua, así como por el agotamiento más frecuente del oxígeno, lo que provocaría que más CO₂ permanezca en la atmósfera (ver [15]).

Actividad 10

DISMINUCIÓN DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL CO₂ EN EL AGUA DE MAR

La temperatura de los océanos está aumentando debido al calentamiento global. En consecuencia, como la capacidad del agua para absorber dióxido de carbono disminuye con el aumento de la temperatura del agua, la concentración de CO₂ en la atmósfera aumenta (ver [16]).

4.3. Puntos de inflexión

El cambio climático da lugar a procesos que actúan de manera auto-reforzante. Los procesos de retroalimentación se producen cuando se superan determinadas temperaturas. En estos umbrales, pequeños cambios pueden hacer que el sistema terrestre pase a un estado cualitativamente nuevo. Es lo que se conoce como punto de inflexión. Por "inflexión" se entiende que los cambios desarrollan una dinámica que ya no puede detenerse, es decir, que es irreversible. El fenómeno de estos procesos de inflexión también interviene en algunos efectos de retroalimentación cuando se consideran de forma aislada. Esto significa que un aumento progresivo de la temperatura puede dar lugar a una cascada de puntos de inflexión que se desencadenan mutuamente ("efecto dominó"). La figura 34 muestra algunos de estos puntos de inflexión.

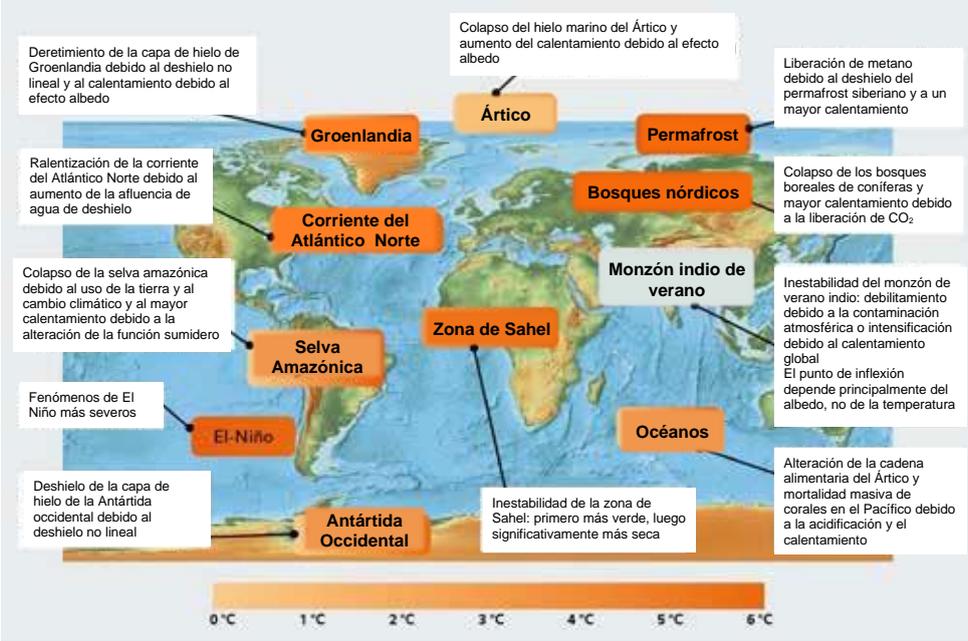


Figura 34 – Elementos de inflexión del sistema climático (Créditos: Global Climate Change, Germanwatch modificado a partir de Lenton et al.)

Capítulo 5

Efectos del cambio climático

5.1. Impacto global del cambio climático

En el capítulo anterior se ha explicado que los seres humanos, es decir, nuestras acciones y nuestro modo de vida, provocan un aumento de las concentraciones de dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno y otros gases de efecto invernadero. El consiguiente aumento del efecto invernadero provoca cambios en la temperatura, las precipitaciones, la nubosidad, la capa de nieve y el nivel del mar, así como una mayor frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos de todo tipo, como largos períodos de sequía y precipitaciones extremas, y un aumento de la actividad atmosférica (tormentas eléctricas, temporales). Algunos de estos efectos se basan en relaciones físicas simples, como el aumento del nivel del mar, la acidificación de los océanos o la reducción del albedo. Otros representan consecuencias no lineales, retroalimentadas y complejas, como el cambio de las corrientes oceánicas con sus efectos sobre los ecosistemas, la habitabilidad de las regiones terrestres y la agricultura, con la pérdida asociada de tierras cultivables. A continuación se abordarán los impactos relacionados con el agua en la Tierra; otros efectos se muestran en la Tabla 2 más adelante.

Cuanto mayor es la temperatura del agua, más rápido se evapora. Esto conduce a la retroalimentación mencionada en el último capítulo. El aumento de la humedad y la mayor energía suministrada a la atmósfera por la condensación, también aumentan la probabilidad y la intensidad de fenómenos meteorológicos extremos como tormentas eléctricas, granizo y tormentas, incluidos los huracanes (ver [17]).

Actividad 6

Uno de los riesgos que supone una amenaza directa para los seres humanos es la subida del nivel del mar. En los años comprendidos entre 1993 y 2010, las consecuencias del efecto invernadero provocaron un aumento del nivel del mar de 3,2 milímetros al año [9]. En su 5º informe sobre el clima de 2013, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) predice que el nivel del mar subirá un total de 52 a 98 centímetros en 2100 si las emisiones de gases de efecto invernadero continúan sin disminuir [9]¹³. Una de las razones de este aumento es que el agua (como todos los líquidos, sólidos y gases) ocupa un mayor volumen a temperaturas más altas. La contribución de esta expansión térmica en el aumento del

¹³ Una excepción es, por supuesto, la anomalía de densidad en torno a los 4 °C, que no desempeña ningún papel en nuestras consideraciones.

nivel del mar se estima entre el 30 y el 55 % [18]. El resto se debe principalmente al deshielo continental, como el de la capa de hielo antártica o los glaciares de Groenlandia¹⁴. Las mediciones actuales han llegado a la conclusión de que la capa de hielo continental se está degradando mucho más rápido de lo que se suponía: a medida que el hielo se derrite, se forma una capa deslizante entre el hielo y el suelo. Esto provoca el deslizamiento de enormes extensiones de hielo hacia el mar [19].

Las previsiones hasta el año 2100 son solo el principio; así lo demuestra la comparación de la temperatura y el nivel del mar en la historia geológica reciente de la Figura 35. La capa de hielo de Groenlandia contiene una cantidad de agua que, si se derritiera por completo, provocaría un aumento global del nivel del mar de siete metros. Si se derritiera la capa de hielo de la Antártida occidental, el nivel del mar subiría 3,5 metros, y si se derritiera la capa de hielo de la Antártida oriental (que hasta ahora se ha considerado bastante estable), el nivel del mar subiría más de 55 metros [7]!

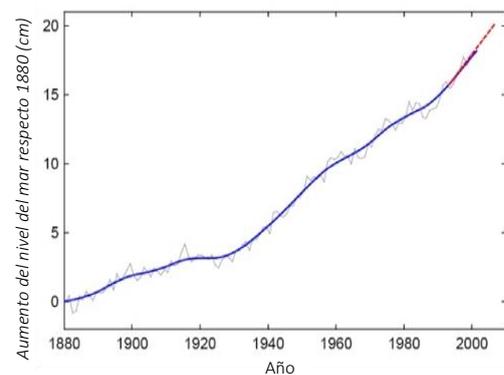


Figura 35 - Aumento del nivel del mar en relación con 1880 (Créditos: Rahmstorf)

Esto provocaría inundaciones catastróficas, sobre todo en las regiones costeras y en las ciudades de baja altitud. Entre ellas se encuentran las zonas más densamente pobladas del mundo: 22 de las 50 ciudades más grandes del mundo están situadas en una costa, entre ellas Tokio, Shangai, Hong Kong, Nueva York y Bombay. En Bangladesh, el 17% de la superficie del país, con unos 35 millones de habitantes, sobresale actualmente menos de un metro del agua. Se prevé que otros países, como el estado insular de Kiribati, sean inhabitables en 2050 y queden completamente sumergidos en 2070. El gobierno de Kiribati ya está tomando medidas para reubicar a sus más de 100.000 habitantes.

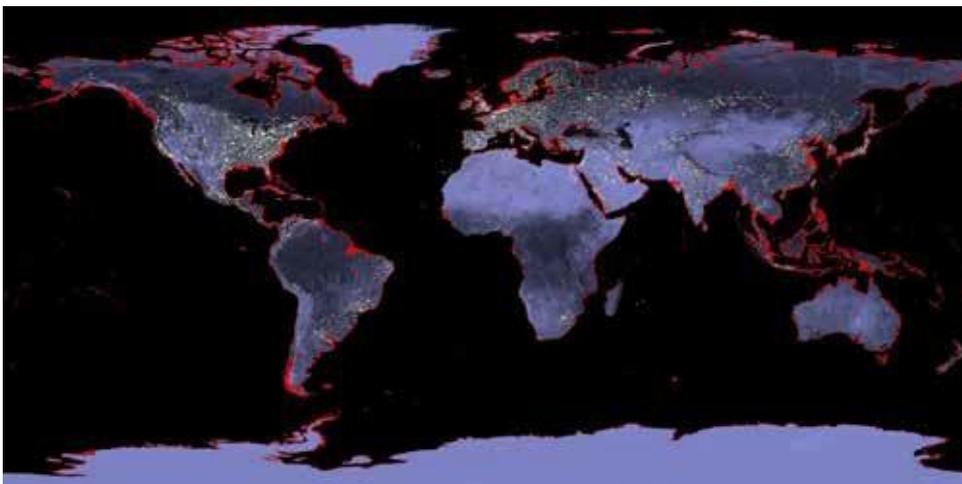


Figura 36 - Zonas costeras afectadas por una subida del nivel del mar de un metro (fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:6m_Sea_Level_Rise.jpg consultado el 27.05.2020)

14 En cambio, el deshielo del hielo marino no provoca una subida del nivel del mar, ver también el experimento del maletín climático.

El calentamiento global también tiene consecuencias de gran alcance para el abastecimiento de agua de muchas personas. Con un aumento de la temperatura de 4 °C, alrededor de una cuarta parte de la población de China y unos 300 millones de personas en la India se verían afectadas por el deshielo de los enormes glaciares del Himalaya. En la región mediterránea y en las regiones meridionales de África, el suministro de agua potable se vería gravemente restringido. Alrededor de dos mil millones de personas en todo el mundo sufrirían las consecuencias de sequías y aridez recurrentes [20].

La siguiente tabla muestra otros efectos sobre los distintos componentes del sistema climático de la Tierra:

Parte del sistema climático	Cambios	Efectos
Hidrosfera	El calentamiento global provoca la expansión térmica de los océanos, el deshielo de la masa de hielo terrestre fluye hacia el mar. El nivel del mar sube.	Inundación de zonas costeras, ciudades costeras, mortandad masiva de peces, algas y otros animales marinos debido al aumento de la temperatura del agua, entre otras cosas.
Atmósfera	El aire caliente y seco intensifica la erosión en algunas regiones, mientras que en otras regiones, un mayor contenido de vapor de agua aumenta la formación de nubes y las precipitaciones.	Condiciones meteorológicas extremas, olas de calor con daños considerables para la flora y la fauna y efectos sobre las personas, lluvias torrenciales con inundaciones repentinas.
Criosfera	El deshielo y la nieve reducen el albedo (reflectividad).	El suelo absorbe más radiación solar, lo que provoca un mayor calentamiento de la Tierra.
Biosfera	Con el calentamiento global, se extinguen especies vegetales y animales (por ejemplo, debido a cambios en las zonas climáticas, cambios en los ecosistemas, sequías, incendios forestales).	Desaparición de bosques y sumideros de CO ₂ . Se almacena menos CO ₂ en los árboles (tronco, ramas, raíces).
Pedósfera y litosfera	Afloramiento de zonas oscuras debido al deshielo del hielo y la nieve.	Reducción del albedo, aumento del calentamiento global.

Tabla 2 - Cambios en los componentes del sistema climático debidos al calentamiento global (Créditos: Scorza)

En conjunto, las consecuencias descritas son catastróficas: la organización de protección del medio ambiente Greenpeace supone que al menos 200 millones de personas tendrán que abandonar sus hogares en 2040 para sobrevivir y convertirse así en refugiados climáticos [21].

5.2. La acidificación de los océanos

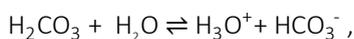
Actividad 9

En este capítulo un tanto "apocalíptico" quizá también habría que mencionar que la capacidad del agua para absorber gases disminuye conforme aumenta la temperatura. En la actualidad, los océanos siguen amortiguando más del 90% del calentamiento global mediante la absorción de calor (ver Hidrosfera en la página 23) y la disolución de dióxido de carbono [22]. Esto disminuirá en el futuro. El hecho de que el agua de mar absorba CO_2 de la atmósfera o lo libere en ella depende de la diferencia de presión parcial de CO_2 : la presión parcial corresponde a la proporción de CO_2 en la presión total dentro de una mezcla de gases. Si la presión del dióxido de carbono en la atmósfera terrestre es superior a la presión parcial del CO_2 en el océano, el agua superficial del océano absorbe dióxido de carbono. Sin embargo, la presión parcial de CO_2 en el agua de mar depende en gran medida de la temperatura: cuanto más caliente está el agua, mayor es. Esto significa que un océano más caliente puede absorber menos dióxido de carbono de la atmósfera que un océano con una temperatura más baja. Por tanto, un aumento de la temperatura de los océanos provoca una mayor concentración de CO_2 en la atmósfera.

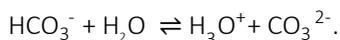
En la atmósfera terrestre, el CO_2 no reacciona con otros gases. Esto es diferente en el agua de mar: el dióxido de carbono disuelto forma compuestos y, por ejemplo, se forma ácido carbónico (H_2CO_3):



El ácido carbónico se divide en iones de oxonio (H_3O^+) e iones de hidrocarbonato (HCO_3^-) mediante la siguiente reacción:

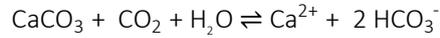


que, a su vez, puede seguir reaccionando si se suministra energía para formar iones oxonio e iones carbonato (CO_3^{2-}):



Como podemos ver cuanto más CO₂ se disuelve en el agua, más oxonio se forma, es decir, más ácidos se vuelven los océanos.

El dióxido de carbono disuelto participa en otro equilibrio. Influye en la formación o disolución de cal (CaCO₃):



Si aumenta la concentración de dióxido de carbono, el equilibrio se desplaza hacia la derecha, de modo que se forma menos cal o incluso se disuelve la cal existente. Esto significa que hay menos cal disponible como material de construcción para los esqueletos y conchas de mejillones, caracoles, erizos de mar, corales, etc.

5.3. Cambio climático en Alemania

Pero, ¿qué efectos concretos del cambio climático pueden inferirse para Alemania? Una comparación global muestra que Alemania se ve especialmente afectada.

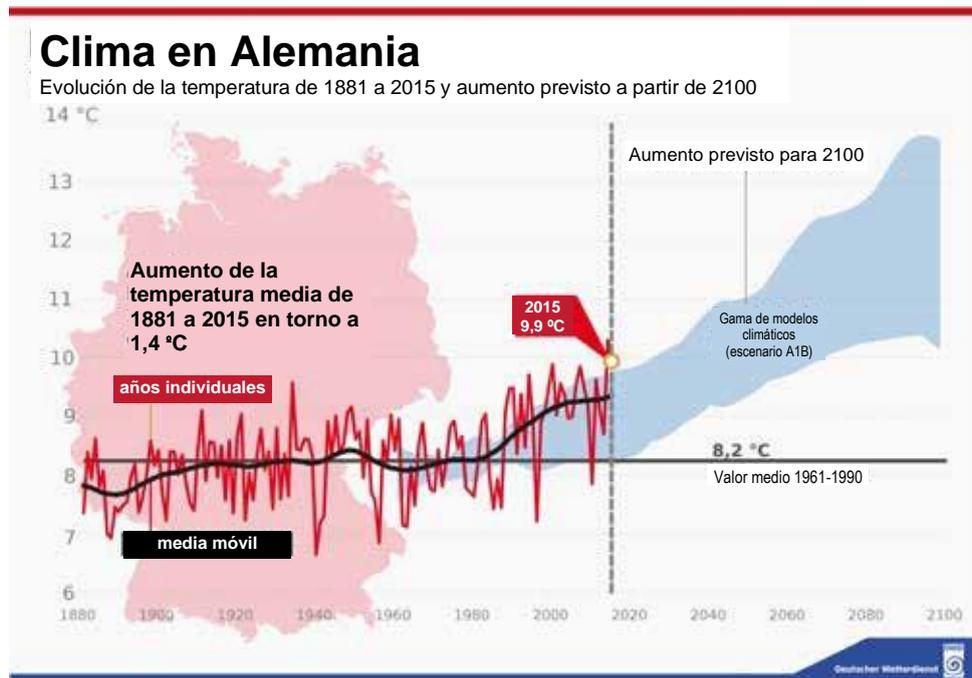


Figura 37 - Evolución de la temperatura en Alemania de 1881 a 2110 (medida o prevista)
(Fuente: https://www.dwd.de/DE/presse/pressekonferenzen/DE/2016/PK_08_03_2016/pressekonferenz.html consultado el 27/05/2020)

Mientras que la temperatura media global en superficie aumentó 0,8 °C entre 1901 y 2012 [23], en Alemania se observa un calentamiento de 1,4 °C durante este período. Desde una perspectiva global, la década de 2001 a 2010 fue la más cálida desde 1861 y, como muestra la figura 37, en Alemania también puede observarse una fuerte aceleración del aumento de la temperatura desde la década de 1980. Se trata de una tendencia que continuará según los modelos climáticos.

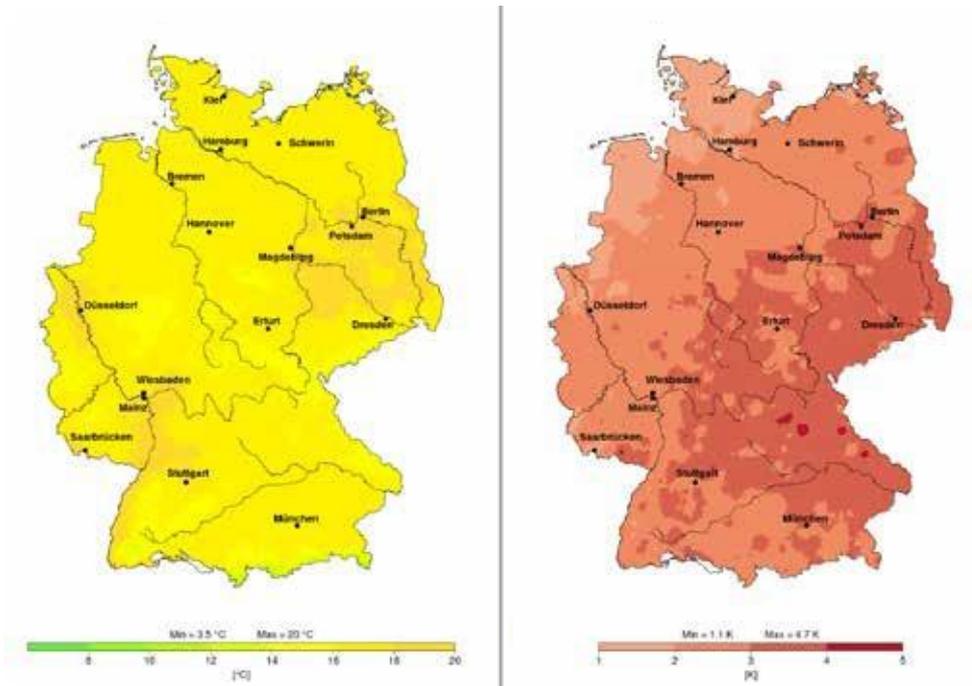


Figura 38 - Desviaciones de la temperatura del aire en agosto de 2018 (imagen de la derecha) respecto a los valores medios (1971-2000, izquierda) (fuente: www.dwd.de/DE/klimaumwelt/)

El aumento de las temperaturas ya está provocando una disminución de los días de heladas en invierno en gran parte del país y, al mismo tiempo, un aumento de los días de verano (temperaturas > 25 °C), los días calurosos (temperaturas > 30 °C) y las noches tropicales (temperatura nocturna > 20 °C) en verano. Las olas de calor estivales serán más largas y calurosas y aumentará el riesgo de sequías [23]. La figura 38 muestra el aumento de las anomalías de temperatura en el mes de mayo. Este tipo de fenómenos meteorológicos extremos, como en agosto de 2018, se producen progresivamente con más frecuencia. Alemania es cada vez más calurosa.

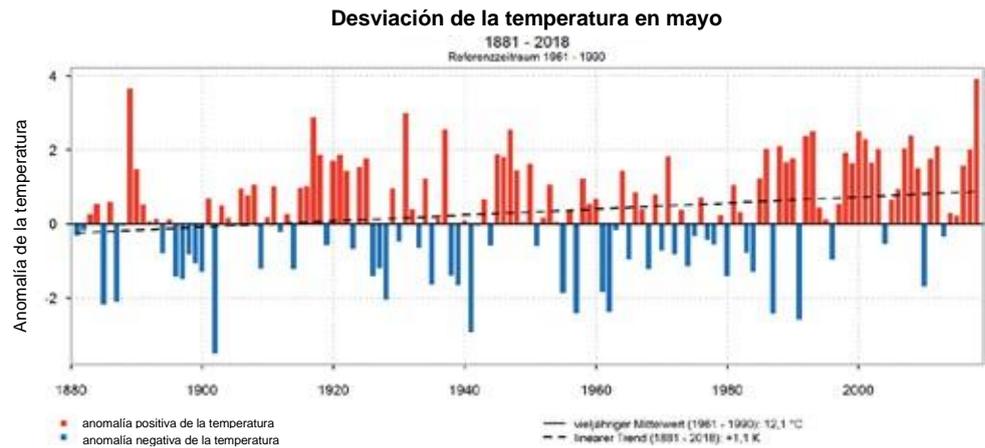


Figura 39 - Desviaciones de la temperatura de mayo en Alemania respecto a la media plurianual (1961-1990)
(Fuente: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaumwelt_node.html consultado el 27/05/2020)

En cuanto a las precipitaciones, el panorama regional es mucho más complejo. Según las mediciones actuales, existe una tendencia a la disminución de las precipitaciones en verano y al aumento de las precipitaciones en invierno, aunque esta evolución está sujeta a fluctuaciones regionales [24].

Debido al aumento de las temperaturas, una menor proporción de las precipitaciones invernales cae en forma de nieve y, por lo tanto, no se almacena temporalmente. Esto aumenta el riesgo de inundaciones y crecidas. Este problema se ve agravado por el aumento de los eventos de lluvias intensas, que ya se pueden observar en toda Alemania.

Además, aumenta el riesgo de tormentas, sobre todo en los meses de invierno, lo que incrementa la probabilidad de marejadas en el Mar del Norte y el Mar Báltico, por ejemplo.

De las complejas interacciones entre las distintas esferas de la Tierra, se puede deducir que los cambios en la atmósfera y la hidrosfera provocados por el cambio climático tendrán diversos efectos en los ecosistemas de Alemania.

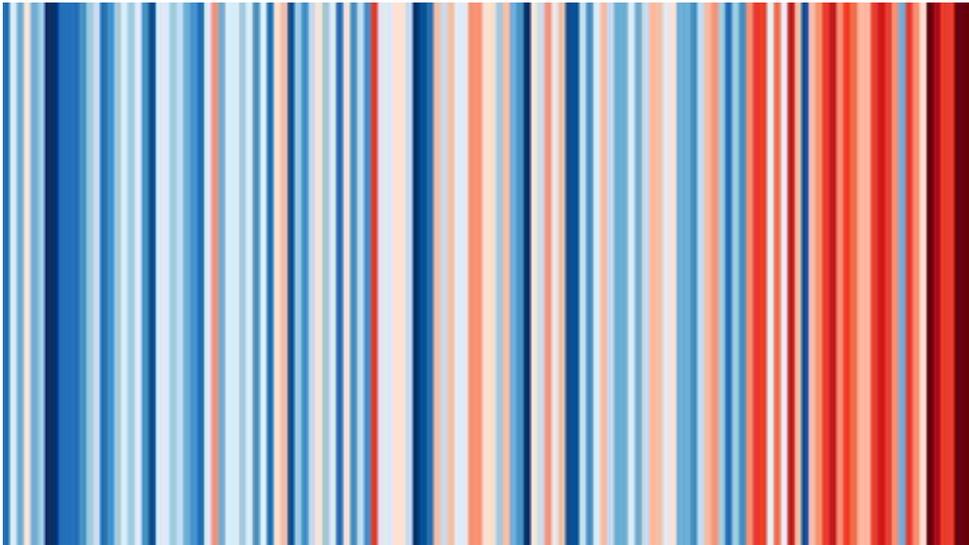


Figura 40 - Desviación de la temperatura respecto al valor medio en Alemania de 1881 a 2020. Azul: más frío que la media; rojo: más cálido que la media (conjunto de datos DWD, Gráfico: Ed Hawkins/klimafakten.de)

Por ejemplo, cabe suponer que la cantidad de precipitaciones en los meses de verano disminuirá y los períodos de calor serán más largos, lo que provocará que los suelos se sequen y endurezcan en verano y que disminuya su capacidad de retención de agua. En los meses de invierno, cuando aumenten las precipitaciones en el futuro, los suelos tendrán menos capacidad para drenar el agua hacia las capas subterráneas, lo que provocará el anegamiento y, por tanto, la compactación del suelo. La alteración de la estructura del suelo modifica sus propiedades como filtro, hábitat y terreno agrícola. Por ejemplo, los suelos podrán almacenar menos nutrientes o filtrar menos contaminantes, lo que afectará negativamente a la fertilidad del suelo. Esto tendrá consecuencias en la agricultura y la silvicultura, por ejemplo en los rendimientos, las variedades de semillas utilizables o el uso de fertilizantes. La vegetación natural también tendrá que adaptarse a las condiciones cambiantes del suelo, lo que llevará a cambios en la flora y la fauna de los ecosistemas.



Figura 41 - Bajo nivel de agua en el Rin durante la sequía estival de 2018 (fuente: SWR Rheinland Pfalz)

La Figura 42 muestra una visión general de las diversas interacciones entre las esferas e ilustra claramente los efectos de largo alcance que el cambio climático puede tener sobre la atmósfera y la hidrosfera.

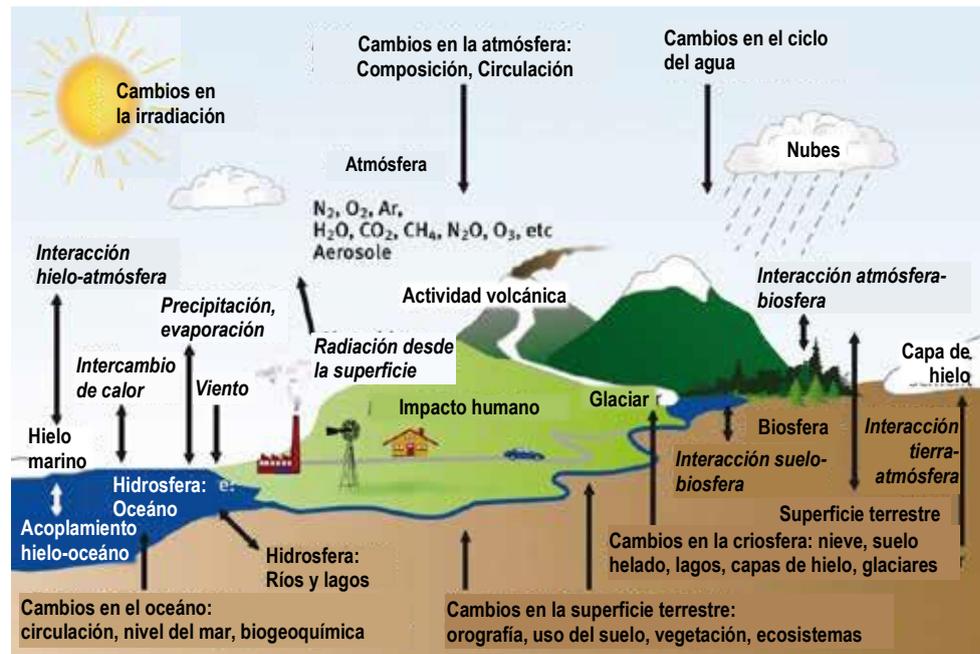


Figura 42 - Componentes del sistema climático y sus interacciones.
 (Fuente: <http://www.oekosystem-erde.de/html/klima-02.html> consultado el 19 de enero de 2019)

En Alemania, por ejemplo, estos incluyen el descenso del nivel del agua de los ríos y el calentamiento de las aguas (el Rin tuvo una temperatura de 28 °C en algunos lugares en el verano de 2018), lo que repercute en la calidad del agua, el aumento del nivel del mar en el Mar del Norte y el Mar Báltico, el deshielo del permafrost en los Alpes y el cambio de las formas de uso de la tierra, con los correspondientes efectos de retroalimentación en los ecosistemas y la biodiversidad.

Junto con los fenómenos meteorológicos extremos descritos anteriormente, como los períodos de calor, las lluvias torrenciales y las tormentas, cada vez más frecuentes, se producen numerosas consecuencias para las personas y la naturaleza.

La gestión del agua, la protección costera y marina, el sector turístico, la ordenación territorial y regional, la construcción, el sector energético, la agricultura y la silvicultura, así como la industria y el comercio, tendrán que hacer frente a los nuevos retos.

5.4. Cambio climático en Baviera

Los efectos del cambio climático ya son claramente perceptibles y medibles también en Baviera. Según el Ministerio de Medio Ambiente y Protección del Consumidor del Estado de Baviera, la temperatura media anual aumentó más de 1,4 °C entre 1881 y 2014, y nueve de los diez años más cálidos en Baviera se produjeron a partir de 1990 [25].

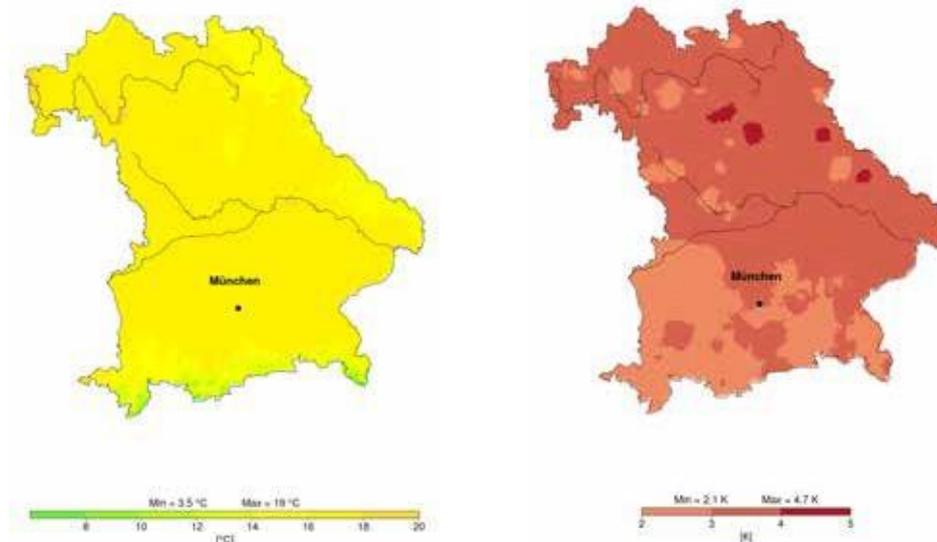


Figura 43 - Desviaciones de la temperatura del aire en agosto de 2018 (imagen de la derecha) respecto a los valores medios (1971-2000, izquierda) (fuente: www.dwd.de/DE/klimaumwelt/)

También aquí esta tendencia ha seguido intensificándose desde el cambio de milenio. La Fig. 43 muestra las desviaciones de la temperatura del aire en agosto de 2018 respecto a los valores medios de los años 1961 a 1990 para Baviera. Este verano, por ejemplo, las temperaturas de agosto en el Alto Palatinado y partes de Franconia estuvieron entre cinco y seis grados centígrados por encima de la media a largo plazo. La frecuencia e intensidad de estos fenómenos meteorológicos extremos también ha aumentado rápidamente en Baviera en los últimos años.

En Baviera, todos los ecosistemas que caracterizan el paisaje, como las cadenas montañosas altas y bajas, los bosques, las praderas, los humedales y los lagos, ya se ven afectados por las consecuencias del cambio climático. También afectan la vida de los habitantes de las ciudades y municipios de Baviera. Si las olas de calor van acompañadas de una sequía pronunciada -como fue el caso en el verano de 2018-, esto tendrá un impacto particularmente grave en los sectores del agua, la agricultura y la silvicultura de la región. En agosto, por ejemplo, en el Alto Palatinado y Franconia hubo entre un 70 % y un 90 % menos de precipitaciones que la media, lo que provocó la pérdida masiva de cosechas en algunos lugares y, en consecuencia, la falta de forraje en muchos sitios.

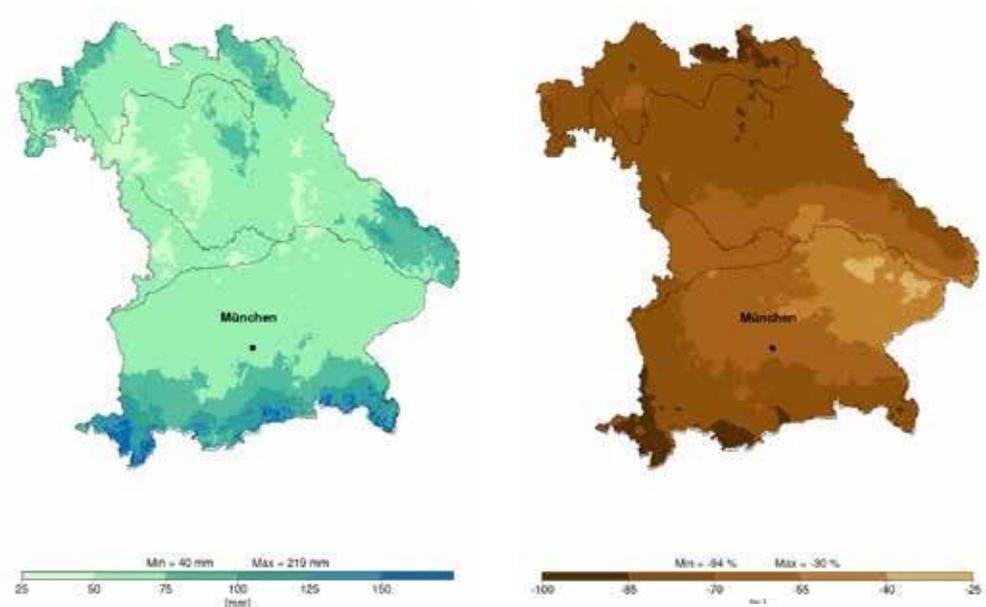


Figura 44 - Desviaciones de las precipitaciones en noviembre de 2018 (imagen de la derecha) respecto a los valores medios (1971-2000, izquierda) en Baviera (fuente: www.dwd.de/DE/klimaumwelt/ consultado el 1 de julio de 2021).

Dado que el cambio climático tiene un impacto cada vez mayor en la distribución y la cantidad de precipitaciones, ha aumentado el riesgo de inundaciones, y también los períodos de sequía. En verano, esto significa que a veces puede esperarse una descarga baja y niveles de agua bajos en los cursos de agua bávaros, con consecuencias para la biosfera, pero también para las industrias del agua y la energía, por ejemplo.

Junto con el aumento de las temperaturas, la disminución de las precipitaciones también provoca una reducción de la recarga de las aguas subterráneas. Si llueve poco en verano, el suelo se seca y no puede absorber las fuertes precipitaciones del invierno, por lo que escurre superficialmente. Esto puede provocar graves inundaciones (ver figura 45) y en consecuencia, un aumento de la erosión del suelo, al tiempo que las reservas de aguas subterráneas solo se reponen de forma limitada.

El problema se agrava por el hecho de que, debido a las temperaturas más altas, caen menos precipitaciones en forma de nieve o la escasa capa de nieve desaparece más rápidamente después de nevar. Como consecuencia, se almacena menos agua durante los meses de invierno y faltan entonces importantes reservas de agua para compensar la sequía estival. La figura 46 muestra los días con una capa de nieve de al menos 15 cm en los meses de invierno del período comprendido entre 1961 y 2002.

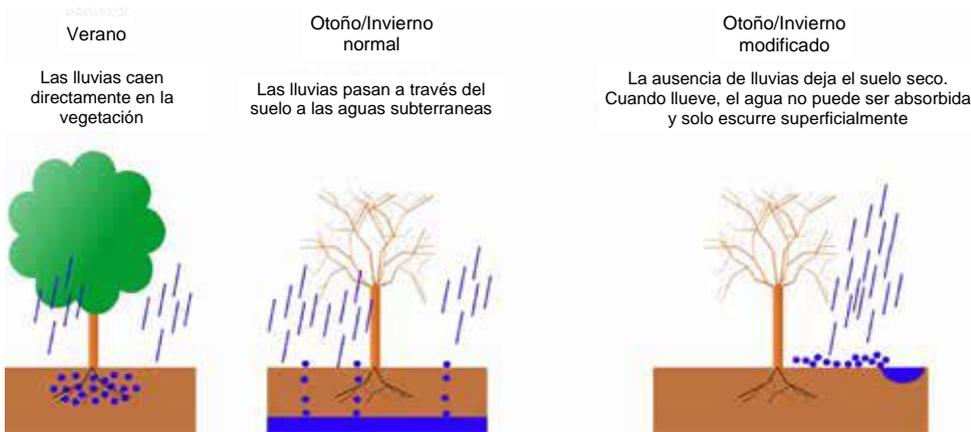


Figura 45 - Reducción de la recarga de aguas subterráneas debido al endurecimiento del suelo (Créditos: Lamparter)

Las consecuencias de esta escasez de agua ya se dejan sentir hoy: como las aguas subterráneas han empezado a escasear en el norte de Baviera, ha habido que bombear agua de la Alta Baviera a la Baja Baviera. Pero la situación también cambiará en la Alta Baviera, que sigue siendo rica en agua. Los cinco glaciares alpinos de Baviera han ido perdiendo volumen desde el inicio de la industrialización. Hoy en día, solo una cuarta parte de la

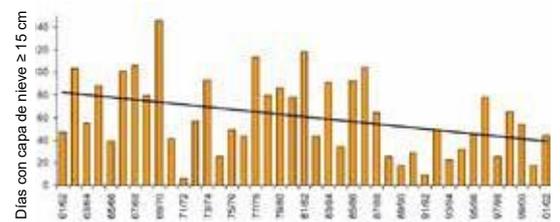


Figura 46 - Días con capa de nieve en Fichtelberg/Franconia, a 685 m sobre el nivel del mar (Créditos: Seifert)

superficie originalmente cubierta, sigue siendo glaciar. Además de un aumento de las inundaciones, las principales consecuencias incluyen una amenaza para los embalses de agua potable, los bosques de montaña y la flora y fauna alpinas.

El aumento de la sequía estival provoca, por tanto, un incremento de la demanda de agua, sobre todo en la agricultura, que no siempre puede satisfacerse y que, por tanto, perjudica la formación de los cultivos y, en consecuencia, provoca pérdidas de rendimiento. Esto se ve agravado por la erosión del suelo y el aumento de fenómenos meteorológicos extremos como lluvias torrenciales, granizo y tormentas.



Figura 47 - Tierra reseca y uvas marchitas en una viña de Baviera (Créditos: Alana Steinbauer)

Excurso: Suelos de páramo en Baviera

PROF. GRAMBOW: JEFE DEL DEPARTAMENTO DE GESTIÓN DEL AGUA Y PROTECCIÓN DEL SUELO DEL MINISTERIO BÁVARO DE MEDIO AMBIENTE Y PROTECCIÓN DEL CONSUMIDOR

Los suelos de las turberas almacenan grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) y desempeñan importantes funciones. Por ejemplo, retrasan el flujo de agua durante las inundaciones y son de gran importancia para la biodiversidad. El constante excedente de agua estancada, alimentado por las precipitaciones (turberas elevadas) o por el alto nivel de las aguas subterráneas (turberas bajas), impide la descomposición de la materia orgánica debido a la falta de oxígeno. El suelo de las turberas es, por tanto, un eficaz almacén de carbono. Con el tiempo, los restos vegetales no descompuestos se depositan y el cuerpo de turba de la turbera crece en altura. Las turberas elevadas alcanzan así una tasa de crecimiento de aproximadamente 1 mm al año [26]. A nivel mundial, las turberas almacenan alrededor de 250 millones de toneladas de CO_2 . Esto significa que en todo el mundo hay más carbono almacenado en las turberas que en los bosques [27].

El drenaje de las turberas, que se practica desde hace muchas décadas, sobre todo con fines agrícolas, provoca la liberación a la atmósfera de grandes cantidades de CO_2 y otros gases de efecto invernadero como el óxido nitroso (N_2O). Además, nutrientes como el fósforo o las sustancias húmicas son lixiviados y vertidos a las aguas río abajo. Esto implica una intervención masiva en el equilibrio hídrico del suelo y del paisaje, lo que en última instancia conduce a un hundimiento de la superficie de la turbera de unos 0,5-2 cm al año [28], así como a un aumento en el flujo de agua y, al mismo tiempo, a una menor capacidad de retención para períodos de sequía, lo que incluso puede implicar la pérdida de la capacidad agrícola de los suelos. Por este motivo, la protección de los suelos de turba altos y bajos existentes, mediante el establecimiento de un nivel de agua que garantice un uso sostenible y la regeneración de las turberas son instrumentos importantes para la protección del clima, del balance hídrico y del microclima local.



Figura 48 - Pantano de Walsrode (Créditos: Paul Krogsgård)

De los aproximadamente 1,8 millones de hectáreas de turberas que hay en Alemania, el 95 % se pueden calificar hoy como degeneradas [29]. En total, las turberas drenadas contribuyen con unos 5,1 millones de toneladas equivalentes de CO_2 a las emisiones de gases de efecto invernadero de Baviera [30]. El Programa de Protección del Clima 2050 del gobierno bávaro pretende reducir considerablemente este efecto. La renaturalización de las turberas en Baviera ya ha logrado un efecto climático positivo de más de 115.000 toneladas de CO_2 [31].

Capítulo 6

Acción

6.1. Necesidad de actuar

En la Conferencia sobre el Cambio Climático de París (COP21), los países acordaron limitar el calentamiento global muy por debajo de los 2 °C, preferiblemente a 1,5 °C. Solo así podremos evitar con una probabilidad razonable que se desencadene la cascada de puntos de inflexión (ver sección 4.3) y que grandes zonas de la Tierra resulten inhabitables a largo plazo. Para cumplir este límite superior, las emisiones de gases de efecto invernadero deben reducirse lo antes posible, porque cuanto más tarde empiece la transición, menos tiempo habrá (ver Figura 49).



Figura 49 - Escenarios de emisión para alcanzar los objetivos climáticos de París. La figura parte del supuesto de que la cantidad total de CO₂ que queda por emitir mediante el uso de combustibles fósiles se limita a una cantidad fija. Por eso se cae en la "trampa integral" si no se empieza a tiempo. Como ya hemos consumido por descuido gran parte de la cuota de CO₂ de la que disponemos, tendremos que hacer un esfuerzo aún mayor en el futuro para evitar acabar en la senda de la "Tierra invernadero".

(Fuente: Spiegel Online; The Global Carbon Project, Nature, Rahmstorf)

En 2020, la cantidad restante necesaria para alcanzar el objetivo de 1,5 grados ya se ha reducido a 420.000 millones de toneladas. Si se utilizaran todas las reservas conocidas de energía fósil de gas natural, petróleo y carbón, se liberarían unos 5.400 mil millones de toneladas de CO₂. Por tanto, ¡el objetivo debe ser dejar estas materias primas bajo tierra y cambiar nuestro suministro energético a energías renovables!

Está claro que, para alcanzar este objetivo, la comunidad mundial debe lograr ser neutra en emisión de gases de efecto invernadero en la segunda mitad del siglo. Sin embargo, el consumo global de carbón, gas natural y petróleo sigue aumentando, a pesar de los esfuerzos por mitigar el cambio climático en algunos países. En muchos

casos, los intereses económicos y la falta de fijación de precios para las emisiones perjudiciales para el clima¹⁵ impiden la aplicación del acuerdo climático.

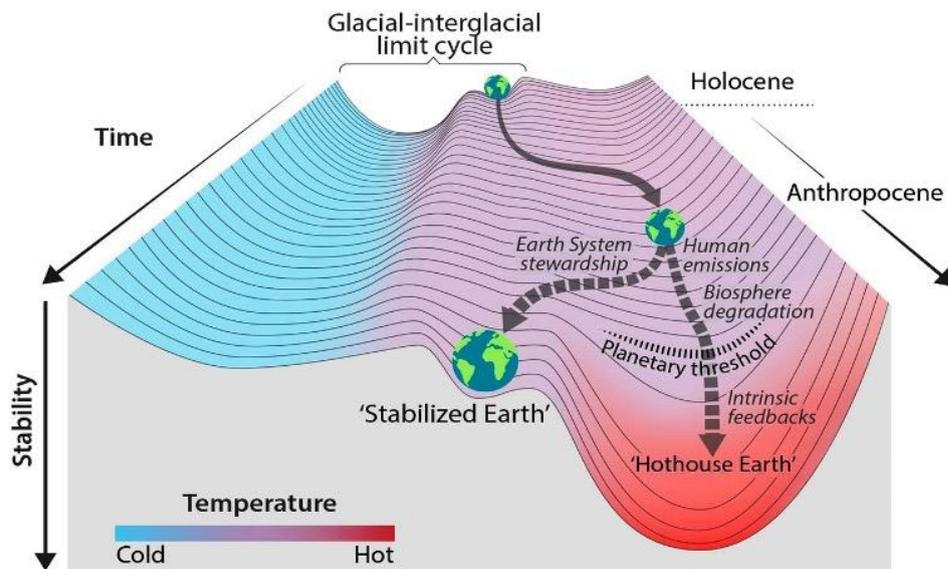


Figura 50 - Trayectorias del sistema Tierra en el Antropoceno. Debido al impacto humano, la Tierra se encuentra en un peligroso punto de inflexión (Créditos: Steffen et al.)

Así pues, si nos tomamos en serio estas resoluciones, nos queda muy poco tiempo para estabilizar el clima de la Tierra y evitar la activación de puntos de inflexión, más allá de los cuales las condiciones climáticas de la Tierra se descontrolarían debido a los efectos de retroalimentación.

Así lo confirmaron científicos del clima dirigidos por Hans Joachim Schellnhuber y Will Steffen en un estudio publicado en 2018 [32] (ver figura 50): durante los últimos aproximadamente 1,2 millones de años de la historia de la Tierra, se alternaron fases relativamente frías y cálidas en un ciclo de unos 100.000 años (ciclo límite glaciares-interglaciares). En la actualidad, la Tierra se encamina hacia un período diabólicamente caliente ("Tierra invernadero"), causado, entre otras cosas, por las emisiones humanas de gases de efecto invernadero y la destrucción de la biosfera (por ejemplo, la deforestación). Si la Tierra cruza el límite de su capacidad planetaria por unos dos grados en esta trayectoria, esta ya no podrá modificarse mediante los procesos de retroalimentación (ver sección 4.2). El camino hacia una Tierra en una trayectoria estable requiere, según Schellnhuber et al., un cambio fundamental del papel de los seres humanos en el planeta: no basta con una reducción decidida y rápidamente aplicada de las emisiones de gases de efecto invernadero. La mejora de la gestión forestal, agrícola y del suelo para almacenar carbono, la preservación de la biodiversidad y las tecnologías para extraer dióxido de carbono de la atmósfera y almacenarlo bajo tierra también pueden desempeñar un papel importante.

15 La Agencia Federal de Medio Ambiente ha calculado los costes de los daños climáticos. Para 2016, el resultado es un valor de 180 euros/t equivalentes de CO₂. En 2030, la cifra es de 205 €/t equivalentes de CO₂ [51].

6.2. La transición energética

Contribución del Dr. Uwe Scheithauer

Para alcanzar el objetivo del Acuerdo de París sobre el clima, a partir de ahora (2021) no podrán liberarse a la atmósfera más de 400 gigatoneladas de CO₂ en todo el mundo [33]. La Figura 51 muestra la situación desglosada de Alemania:

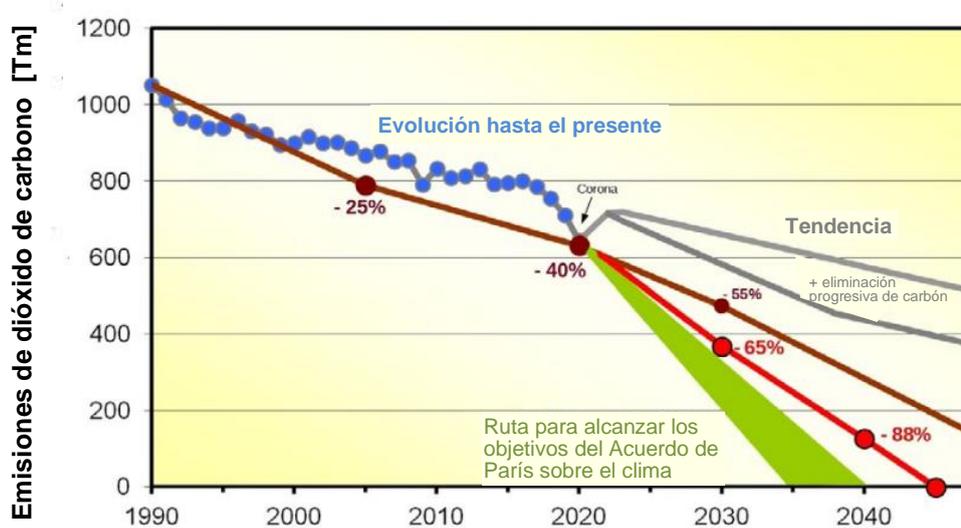


Figura 51 - Evolución de las emisiones alemanas de CO₂, comparación del objetivo climático de París con los objetivos alemanes y extrapolación de nuestras emisiones de CO₂ (datos: Agencia Federal de Medio Ambiente)

La figura muestra las emisiones anuales de CO₂ medidas y previstas para el período comprendido entre 1990 y 2048. La trayectoria de reducción para alcanzar el objetivo de 1,5 °C presupone que lograremos establecer un suministro energético totalmente libre de combustibles fósiles como el gas natural, el petróleo y el carbón para 2040. Esta senda de reducción necesaria es bastante más ambiciosa que los planes del Gobierno Federal. Tras la decisión del Tribunal Constitucional Federal en mayo de 2021, que declaró inconstitucionales partes de la Ley de Protección del Clima por no tener suficientemente en cuenta los intereses de las generaciones futuras, el Gobierno Federal ha elevado los objetivos. Los objetivos coinciden ahora con los de la Unión Europea. Sin embargo, los objetivos tendrían que ser más ambiciosos para alcanzar el objetivo de 1,5 grados del Acuerdo de París. Sigue habiendo una gran desviación entre los objetivos fijados y la tendencia prevista de nuestras emisiones de CO₂. Todavía faltan planes y objetivos concretos por parte del Gobierno alemán sobre cómo alcanzar estas metas.

Una cosa está clara: si en el futuro prescindimos de los combustibles fósiles, habrá que sustituirlos por energía generada a partir de fuentes renovables. E incluso si el potencial de la biomasa, la energía geotérmica y la energía solar térmica se utiliza con sensatez, la electricidad procedente de centrales fotovoltaicas (células solares) y eólicas tendrá que cubrir esencialmente nuestras necesidades energéticas en Alemania en el futuro¹⁶. Con el consumo actual de energía en Alemania de unos 3.500 TWh al año [34], ¡esto es imposible! Por tanto, la transición energética debe ir

¹⁶ Se trata del consumo total de energía primaria en Alemania. También incluye, por ejemplo, las necesidades energéticas de las calefacciones de gasóleo, el tráfico de automóviles y la industria alemana.

necesariamente acompañada de ahorro y aumento de la eficiencia¹⁷. La figura 52 parte de la premisa que la generación de energía eléctrica se incrementará hasta alcanzar los aproximadamente 1.300 TWh por año para 2040, de manera que cubra la totalidad de la demanda energética, la cual se habrá reducido considerablemente en comparación con la actual, y se sustituyan así los combustibles fósiles.

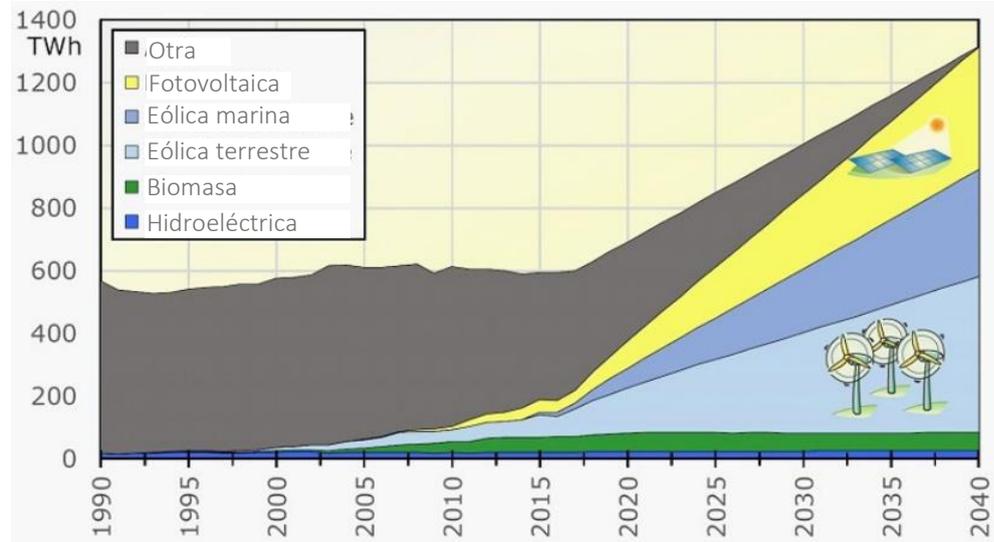


Figura 52 - Evolución de la generación de electricidad renovable y del consumo de electricidad en Alemania hasta 2040 para lograr un suministro energético neutro para el clima, teniendo en cuenta las medidas de ahorro y eficiencia (Créditos: V. Quaschnig [39])

En la actualidad (2020), las energías renovables solo cubren en torno al 14% de las necesidades energéticas totales de Alemania. El aumento de la generación de energía renovable se logrará principalmente mediante una mayor expansión de las tecnologías establecidas de aprovechamiento de la energía eólica y fotovoltaica, cuya expansión debe acelerarse considerablemente: es necesario un aumento de 10 GW al año en energía eólica y 20 GW al año de energía fotovoltaica¹⁸. ¡Las regulaciones legislativas deben apoyar esta rápida expansión!

La seguridad del suministro cuando no haya viento y esté oscuro se garantizará con la introducción a gran escala de tecnologías de almacenamiento en baterías y de conversión de energía en gas/líquido.

Para que la eliminación progresiva del uso de combustibles fósiles tenga éxito en 2040, debe reducirse al mínimo la compra o instalación de tecnologías antiguas basadas en combustibles fósiles, teniendo en cuenta la vida útil prevista de la tecnología.

17 Ejemplos de mejoras de la eficiencia: 1. Un coche con motor de combustión interna requiere 65 kWh/100 km debido a la baja eficiencia del motor. El mismo coche con un motor eléctrico alimentado por batería necesita 20 kWh/100 km. ([49], p. 22) 2. Calefacción y agua caliente (aproximadamente el 32 % del consumo de energía en Alemania en 2014): Mediante el uso de bombas de calor eléctricas, se puede extraer del medio ambiente entre dos y tres veces más energía térmica para calentar las habitaciones y el agua que la que se utiliza en forma de energía eléctrica para el bombeo (principio del frigorífico inverso). ([49], S. 15)

18 La producción resulta de la potencia disponible multiplicada por el período de utilización. La energía fotovoltaica puede suministrar unas 950 horas de electricidad al año en Alemania. En el caso de la energía eólica, las horas de funcionamiento anuales son de unas 2.500 horas en emplazamientos terrestres y de unas 4.500 horas en emplazamientos marinos.

Por ejemplo, los coches con motor de combustión interna, que tienen una vida útil de unos 15 años, deberían dejar de estar permitidos a partir de 2025.

Así que ya sabemos lo que tenemos que hacer:

-
1. *Debemos reducir significativamente nuestras necesidades energéticas y utilizar la energía de forma eficiente.*
 2. *La energía que utilizamos no debe basarse en la combustión de combustibles fósiles.*
-

Dado que el tema de las energías renovables está en el centro de la lucha contra el cambio climático, hemos creado materiales didácticos basados en el libro "Erneuerbaren Energien zum Verstehen und Mitreden" (Holler, Gaukel, Lesch und Lesch) tanto para institutos de enseñanza primaria como secundaria. Pueden descargarse gratuitamente en: <https://klimawandel-schule.de/de/event/erneuerbare-energien-im-unterrichtw>



6.3. Psicología social y protección del clima Contribución de Gabriel Appl Scorza

A continuación nos centraremos en los obstáculos psicológicos que, según diversos estudios psicológicos, impiden a las personas pasar a la acción, y debatiremos formas de superar estos obstáculos.

OBSTÁCULOS PSICOLÓGICOS

A. Distancia psicológica

Para muchas personas, las causas y consecuencias del cambio climático parecen lejanas, casi intangibles. Esta llamada distancia psicológica se compone de varios factores: distancia espacial, temporal y social, así como el grado de incertidumbre. Para contrarrestar la gran distancia psicológica en el caso del cambio *climático*, es necesario *llamar la atención sobre sus consecuencias locales*: Sentimos estos efectos *aquí* y los sentimos ahora.

¿Qué hacer? → Discutir en clase los efectos directos sobre la vida de los propios alumnos, sus familias, su entorno social y sus alrededores. Como las consecuencias del cambio climático en las ciudades a menudo permanecen invisibles debido a las infraestructuras y a la falta de naturaleza, merece la pena hacer una visita a una granja o a un silvicultor, por ejemplo, y entrevistarles. Por regla general, los pueblos pequeños están mucho más expuestos a fenómenos meteorológicos extremos, por lo que también sería posible investigar las inundaciones en las comunidades vecinas.

B. Ansiedad climática y autoeficacia percibida

Los efectos inmediatos del cambio climático (no son agradables y) pueden (incluso) asustar. En algunos casos, un gran temor puede ser paralizante, sobre todo si va acompañado de la sensación de que no se puede cambiar nada. Sin embargo, si los alumnos *tienen la impresión de que pueden cambiar las cosas con su comportamiento*, es decir, que experimentan *autoeficacia*, las emociones negativas también pueden tener un efecto positivo. Por tanto, los alumnos deben comprender cómo pueden actuar concretamente y qué comportamientos de protección del clima son realmente eficaces y cuáles no lo son tanto.

¿Qué puedes hacer? → Elabora con los alumnos distintas acciones de protección del clima y clasifícalas como "eficaces" y "respetuosas con el medio ambiente". "eficacia limitada" (ver sección 6.4).

C. Difusión de la responsabilidad

Otro obstáculo estrechamente relacionado con la autoeficacia percibida es la llamada difusión de la responsabilidad. Creencias como: "De todas formas, no puedo cambiar las cosas con mi comportamiento, porque todos los demás seguirán actuando igual", pueden hacer que la concientización sobre el clima no se traduzca en un comportamiento respetuoso con el clima. Si este pensamiento se generaliza y se traslada la responsabilidad a los demás, se producirá una pasividad colectiva. La clave *está en los grupos y sus dinámicas tan especiales*. En un grupo, por ejemplo una clase escolar o incluso grupos dentro de una clase escolar, es posible exigir un comportamiento adecuado estableciendo normas, como la protección del medio ambiente, sobre todo si el grupo es importante para la persona. Al mismo tiempo, el grupo también crea un sistema de referencia local para la responsabilidad, que contrarresta la difusión de la responsabilidad.

¿Qué puedes hacer? → Organizar *trabajos en grupo y proyectos de grupo más largos* sobre el tema. Sería importante que los proyectos no solo tuvieran lugar dentro de la escuela, sino que conectaran el mundo exterior con la escuela, facilitando a los alumnos la transferencia de lo aprendido a su vida cotidiana.

Marco positivo

Muestre a los alumnos cómo pueden proteger eficazmente el clima en su vida cotidiana. Cuando se trata de acciones concretas y de cambiar viejos comportamientos, es importante *formular los mensajes de forma positiva*. Para las personas, las pérdidas pesan aproximadamente el doble que las ganancias; por eso no queremos llamar la atención principalmente sobre los sacrificios, sino sobre el comportamiento alternativo.

¿Qué hacer? → En lugar de "Conduce menos coche", "¡Monta más en bici y mantente sano!". Esto también puede centrar la atención en otros beneficios asociados al nuevo comportamiento, como más ejercicio en este caso. Otros ejemplos serían

- ✓ Compra productos frescos y regionales, más ricos en vitaminas que los importados.
- ✓ Pon la calefacción a un nivel bajo para que tus mucosas permanezcan húmedas. ¡Así estarás protegido contra los gérmenes!
- ✓ Hazte vegetariano (a tiempo parcial). ¡Es saludable!
- ✓ ¡Compra con cuidado cosas que realmente necesites y que vayas a disfrutar durante mucho tiempo!
- ✓ ¡Invierte tu dinero únicamente en proyectos que beneficien a otras personas y sean buenos para la naturaleza!

COMPROMISO TRANSFORMADOR:

¡LA OPORTUNIDAD DE MARCAR LA DIFERENCIA!

Transformar significa cambiar las estructuras sociales mediante un comportamiento activo. El concepto de "compromiso transformador" significa, por tanto, iniciar el cambio a través del propio compromiso y las propias acciones. Derivado originalmente del programa educativo de la UNESCO "Enseñar y aprender el compromiso transformador" (ver la bibliografía), lo hemos adaptado aquí al cambio climático:

¿Qué se entiende por "compromiso transformador"?

El compromiso transformador tiene lugar a dos niveles:

1. El proceso por el que pasan los alumnos para lograr un compromiso climático motivado internamente
2. El impacto del compromiso de los estudiantes en las instituciones y normas establecidas

El proceso de compromiso transformador en las escuelas

A continuación describimos el punto uno: el proceso por el que pasan los alumnos para lograr un compromiso climático motivado internamente. En la UNESCO, este proceso se subdivide en varios subprocesos:

1. Percepción de una brecha: ideal vs. status quo

El compromiso transformador suele comenzar con su percepción de la existencia de una brecha entre la realidad y lo que se considera el estado ideal.

En relación con el cambio climático, sería la discrepancia entre la preservación de nuestro planeta como estado ideal y la realidad actual, es decir, el statu quo, en el cual muchos agentes económicos, políticos e individuales siguen funcionando de la misma manera, persiguiendo el "business as usual", es decir, la continuación de procesos

y comportamientos perjudiciales para el clima sin cambiar nada. Esto puede llevar a un "despertar", la toma de conciencia de que urge un cambio.

2. Internalización

Estos momentos de "despertar" suelen ir acompañados de disonancia cognitiva o agitación emocional que estimulan a los estudiantes a pensar de forma crítica o a autorreflexionar. Pueden surgir preguntas como:

¿Cómo es posible que ocurra tan poco cuando los hechos son tan claros?

¿Qué puedo hacer para desempeñar mi papel?

¿Qué debo hacer de forma diferente?

Esta toma de conciencia interna puede llevar a los alumnos a actuar de forma activa y trasladar así el cambio interno al mundo exterior.

3. Actuar activamente

No todas las experiencias y momentos de "despertar" [...] dan lugar a que los alumnos pasen a la acción o cambien su comportamiento. Hay algunos factores favorables que pueden desencadenar la acción. Por ejemplo:

Empatía

Además del enfoque cognitivo del aprendizaje de contenidos, el enfoque socioemocional es también de gran importancia, especialmente cuando se trata de pasar a la acción. La empatía permite a los alumnos enfrentarse a la realidad de una situación o un problema y, a continuación, *establecer una conexión emocional más profunda con ellos*, lo que, al mismo tiempo, pone de manifiesto la relevancia para sus propias vidas.

Autoeficacia

Además de saber que hay que hacer algo, es especialmente relevante saber y sentir *que uno mismo puede aportar algo*.

Momentos de inflexión

Además de la empatía y la autoeficacia, son de gran importancia los llamados momentos de inflexión, en los que los estudiantes pueden traducir todas sus observaciones cognitivas, emocionales y sociales en una acción desafiante. Esto ocurre sobre todo cuando los jóvenes *visualizan una oportunidad concreta y factible* de provocar un cambio con sus conocimientos y su compromiso social. La pertenencia a un grupo puede actuar aquí como catalizador. Un ejemplo: el mensaje "Corona - 80 millones de bebés sin vacuna" nos entristece, pero no podemos hacer nada al respecto.

Sin embargo, cuando los alumnos se enteran de que, en caso de una transición energética del 100 % en Alemania, el consumo de energía debe, no obstante, reducirse, se sienten aludidos y en condiciones de participar activamente.

6.4. Acciones concretas para alumnos

Contribución de Thomas Hensel y Moritz Strähle

Después de 65 millones de años, la vida en nuestro planeta experimenta por sexta vez una extinción masiva. La dramática diferencia con las veces anteriores: esta vez no son los meteoritos ni las erupciones volcánicas los responsables, sino la emisión de gases de efecto invernadero por parte de la humanidad...

!Cada persona viva hoy tiene la responsabilidad de mantener la Tierra en la que vale la pena vivir!

¡AHORA es el momento de luchar por la vida en este planeta!

¡La ignorancia o la represión no pueden servir de excusa!

Pero, ¿cuál es el mejor lugar para empezar a proteger el clima? Puedes utilizar como guía estos cinco puntos, que se explican con más detalle a continuación:

1. ¡Diviértete con la protección del clima!
2. Saber es poder: ¡infórmate!
3. ¡Maximiza el efecto protector del clima de tus acciones!
4. ¡Haz Política!
5. ¡Une fuerzas!

¡Las consecuencias ecológicas y sociales, pero también financieras y económicas, de un cambio climático descontrolado son mucho más devastadoras de lo que pudieron ser las de la crisis del coronavirus!

Sin embargo, ¡las medidas que todos tendríamos que tomar para contrarrestar la crisis climática serían mucho menos radicales!

Prof. Dr. Volker Quaschnig sobre las consecuencias y limitaciones de la crisis de los coronavirus en comparación con la crisis climática [35].

1. Diviértete con la protección del clima

Puedes hacer mucho para ayudar a proteger el clima y el medio ambiente. Lo mejor es que empieces por algo que te guste: ¿te gustaría empezar por ver un documental sobre el cambio climático?¹⁹ ¿O te interesa la cocina? Entonces ponte el reto de cocinar de la forma más respetuosa con el clima y deliciosa posible el mes que viene: con la menor cantidad posible de carne y productos animales, pero con verduras de temporada y otros ingredientes con la ruta de transporte más corta posible.

¿Eres deportista o quieres serlo y tus padres te llevan o sigues yendo al colegio en coche? Entonces pásate al transporte público, a la bicicleta o a una mezcla de ambos.

Empiece como empiece: Sé creativo y diviértete haciéndolo. Así te convertirás automáticamente en un modelo a seguir para amigos y padres... ¡quizá alguien se una pronto! Y una vez que hayas empezado a actuar, ¡seguro que se te ocurren otras cosas que TÚ puedes hacer para luchar por la conservación de la diversidad y la belleza de la Tierra!

2. Saber es poder: ¡infórmate!

Mantente informado: documentales, películas de cine, libros, artículos de prensa, podcasts y mediatecas en la red te ofrecen oportunidades de primera para estar al día. Hemos reunido una gran selección para ti en nuestro sitio web www.klimawandel-schule.de/handeln.

Las personas informadas no se dejan llevar por todas las modas y el lavado verde²⁰ y están atentas a los grupos de presión y las noticias falsas. ¿Cómo reconocer las noticias falsas? En primer lugar, por las fuentes: se citan algunos "portales de la verdad" en lugar de fuentes científicas. Investigando en portales científicos (puedes encontrar un resumen aquí: www.klimawandel-schule.de/quellen) es posible obtener información fiable. Pronto comprenderás más las conexiones y desarrollarás una conciencia cada vez mayor de lo que realmente está en juego, quién miente y quién engaña.

¹⁹ Hemos reunido para ustedes muchos documentales, cortometrajes, vídeos, etc. entretenidos, emocionantes e informativos en nuestro sitio web: www.klimawandel-schule.de/handeln

²⁰ El lavado verde se produce cuando las empresas presentan su imagen o la de sus productos como más verdes y sostenibles de lo que son en la realidad. Por ejemplo, cuando se imprime una hoja verde y la palabra eco en envases de plástico. O cuando una gran empresa energética alemana se anuncia en un vídeo con un gigante plantando turbinas eólicas, aunque en el momento de la emisión solo el 0,1% de la electricidad de la empresa procede de la energía eólica.

3. Maximiza el efecto protector del clima de tus acciones

¿Qué medidas son las más eficaces? Para responder a esta pregunta, primero presentaremos el principio de la AEE y analizaremos una huella de CO₂ típica.

HERRAMIENTAS BÁSICAS:

AHORRO, EFICIENCIA Y ENERGÍAS RENOVABLES (AEE)

Ahorro²¹

Consumir menos y vivir frugalmente es la medida más sencilla, barata, rápida y ¡la más inmediata!

Fiel al lema "*menos es más*": recorre menos kilómetros en coche, viaja menos en vacaciones, compra cosas nuevas con menos frecuencia, pero adquiere artículos favoritos de alta calidad y larga duración que puedas utilizar durante mucho tiempo. Ya sea ropa, electrodomésticos o muebles: ¡lo que no se fabrica no genera emisiones de CO₂!

Simplemente mira el tema del ahorro como una alternativa creativa con la que también puede ahorrar mucho dinero:

- ✓ El minimalismo puede ser muy liberador.
- ✓ ¡No dejes que los anuncios te digan lo que necesitas!
- ✓ ¡Repara, comparte, presta y pide prestado!
- ✓ Come mucha menos carne y otros productos animales. En su lugar, come alimentos de alta calidad, regionales, de temporada y frescos que contengan gran cantidad de nutrientes.

Eficiencia

Cuanta menos energía utilices para alcanzar un objetivo concreto, más eficaz será tu actuación.

Para lograr el objetivo de "iluminar mi habitación", utilizar una lámpara LED es una opción muy eficiente en comparación con utilizar bombillas o poner velas. Para lograr el objetivo de "mantener mi cuerpo caliente", ponerse un jersey es mucho más eficiente energéticamente que encender la calefacción.

²¹ Consumir menos es un paso importante, si no el más importante. Mediante una hábil publicidad, las empresas consiguen aumentar la producción y, al mismo tiempo, la demanda de materias primas escasas casi cada trimestre. Hace unos 50 años, el Club de Roma describió con gran precisión los peligros económicos y, sobre todo, ecológicos en su obra "Los límites del crecimiento". Hoy necesitaríamos casi tres Tierras si todos los habitantes del planeta llevaran una vida tan orientada al consumo como la que llevamos los alemanes.

Más ejemplos: En un coche totalmente ocupado, cada pasajero consume solo alrededor de una quinta parte de la energía que en uno que viaja solo, ¡por lo que es cinco veces más eficiente! Los SUV²² son muy poco eficientes ya que, debido a su elevadísimo peso muerto, tiene que acelerar y frenar constantemente. Por esto, además del uso de la bicicletas, pedelec²³, los coches, los ciclomotores eléctricos y el transporte público local, los coches pequeños con poco peso muerto y totalmente ocupados son formas eficientes de desplazarse.

¡Un verdadero elefante entre las medidas hacia una mayor eficiencia energética es el aislamiento de tu propia vivienda! En la actualidad, el Estado subvenciona en gran medida los esfuerzos para conseguirlo.

Otras formas de evitar las emisiones perjudiciales para el clima con tecnologías eficientes son, por ejemplo, los frigoríficos y otros electrodomésticos con una clase de eficiencia energética A²⁴; ¡pero seguro que encuentras muchas más opciones!

Energías renovables

En Alemania, al igual que en el resto del mundo, la demanda de energía eléctrica no ha dejado de aumentar en las últimas décadas [36]. Por un lado, esto se debe a nuestro acomodado estilo de vida: Hoy poseemos 5 veces más artículos que hace 40 años. La segunda razón del aumento de la demanda de energía eléctrica es que las tecnologías modernas, como los sistemas de calefacción con bomba de calor, la e-movilidad y la industria, dependen cada vez más de la electricidad²⁵. La base de todos los objetivos de protección del clima es, por tanto, cubrir la demanda de electricidad a partir de fuentes renovables como el Sol y el viento en lugar de combustibles fósiles. Gracias al alto nivel técnico de las centrales fotovoltaicas y eólicas actuales, esta forma de generación de energía no solo es ahora mucho menos emisiva, sino también más barata. EnBW, la tercera empresa energética de Alemania, invierte casi 100 millones de euros en el mayor parque solar del país, y sin subvenciones estatales.

22 Paradójicamente, los SUV son muy eficientes sobre el papel. Un SUV de 2 toneladas produce menos emisiones que cuatro coches pequeños de 0,5 toneladas. Comparar un coche con cuatro coches en términos de peso total es totalmente ilógico y una distorsión de la realidad, pero es un buen argumento de ventas. Y como la industria automovilística gana mucho dinero con los coches grandes y tiene cierta influencia, los valores se expresan así.

23 Pedelec: Bicicleta eléctrica que ofrece pedaleo asistido hasta una velocidad de 25 kilómetros por hora.

24 Las clases de eficiencia energética cambiaron en marzo de 2021. Las "clases plus" A+ a A+++ ya no se aplican. Ahora hay clasificaciones de la A a la G, siendo la A la de mayor eficiencia energética.

25 En el contexto de la neutralidad de gases de efecto invernadero prevista en Alemania, las industrias que consumen mucha energía, como la siderúrgica y la química, en particular, deben cambiar sus procesos de producción, es decir, abandonar los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas y sustituirlos por hidrógeno a partir de electricidad verde. Solo la industria química necesitaría actualmente una séptima parte de la producción de electricidad de Alemania como consecuencia de este cambio. [53]

El gráfico adyacente muestra las emisiones causadas en gramos por kilovatio hora de energía eléctrica, en función de la energía de generación, si se incluyen la construcción de la central, la distribución de la energía y la eliminación de la central. La generación de un kilovatio hora de energía eléctrica en un aerogenerador emite 25 gramos, es decir, 0,025 kg de CO₂, mientras que la generación en una central térmica de carbón emite aproximadamente un kg, es decir, ¡40 veces más! [37]

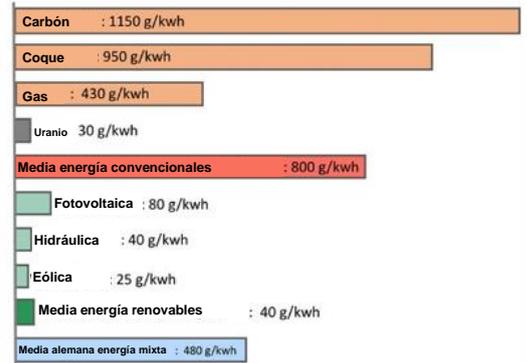


Figura 53 - Emisiones de CO₂ por fuente de energía en 2017 (fuente: Naturwissenschaften Europa Verlag)

Cambiar a una auténtica electricidad verde en su hogar es muy fácil de realizar, muy eficaz y, por tanto, ¡debería ser uno de los primeros pasos! La electricidad 100% verde la venden empresas que no explotan centrales de carbón ni nucleares y no cuesta mucho más que la electricidad convencional.

La obtención de calor doméstico a partir de fuentes renovables, como una bomba de calor, tiene un impacto aún mayor en la protección del clima. Según las opiniones de los expertos [38], [39], en las próximas décadas necesitaremos entre cuatro y cinco veces más sistemas fotovoltaicos y entre cuatro y cinco veces más turbinas eólicas para cumplir los objetivos climáticos de París. La expansión y aceptación de la energía fotovoltaica y la eólica dependen en gran medida del marco jurídico. Por eso es especialmente importante implicarse políticamente: ¡infórmate!

UN ANÁLISIS MÁS PRECISO PARA AHORRAR: LA HUELLA DE CO₂

Tu huella personal de CO₂²⁶ muestra cuánto CO₂ producen tus acciones (y, a la inversa, dónde puedes ahorrar CO₂). Puedes calcularlo tú mismo en unos minutos utilizando varias calculadoras de CO₂ en Internet, por ejemplo, en el sitio web www.uba.co2-rechner.de (Agencia Federal de Medio Ambiente) o en www.fussabdruck.de (Pan para el Mundo)²⁷.

26 Junto con el metano, el óxido nitroso y varios otros gases, el CO₂ es el gas de efecto invernadero que tiene el mayor impacto global sobre el cambio climático. Por ello, el texto que sigue se refiere simbólicamente al CO₂, aunque, dependiendo del ejemplo, también intervienen otros gases de efecto invernadero.

27 Cuando creas tu PROPIA huella de CO₂, calculas TUS emisiones de CO₂ en cinco áreas principales. También puedes utilizar la calculadora de CO₂ para obtener consejos específicos sobre todas las áreas y desarrollar una idea de cuáles de TUS medidas ahorrarán cuánto CO₂.

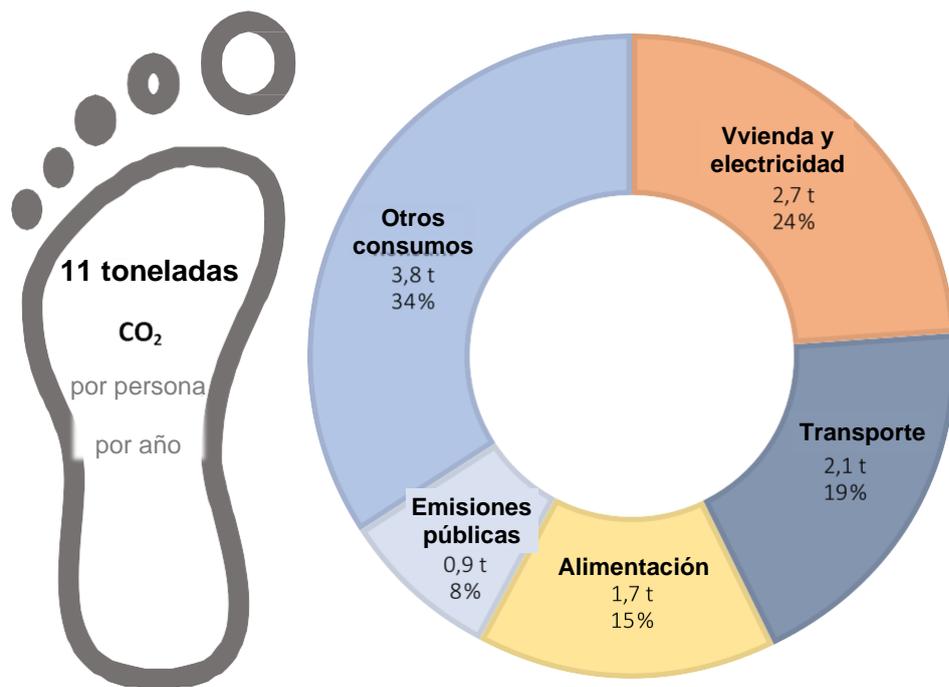


Figura 54 - Huella de CO₂ de un alemán medio (datos: Agencia Federal de Medio Ambiente).

En la Figura 54 se muestra la composición de la huella de CO₂ de un alemán medio. A continuación se analizan con más detalle las cinco áreas principales:

(A) Consumo: 3,8 toneladas

La compra de todo tipo de bienes y servicios contribuye a cerca de una cuarta parte de las emisiones de dióxido de carbono. Teléfonos móviles, ropa, electrónica de consumo, muebles y electrodomésticos, decoración, envases, artículos deportivos, etc. Para que todos estos productos lleguen a tu casa, suelen ser necesarios los siguientes pasos: extracción de materias primas, producción, transporte, almacenamiento, comercialización, envío, solo para acabar convirtiéndose en basura en algún momento²⁸.

Adicionalmente, los servicios como la entrega de zapatos de varias tallas con devolución gratuita o los servicios de streaming y comunicación²⁹ pueden ser cómodos y baratos y a menudo parecen indispensables, pero no lo son y tienen un alto coste climático y ambiental en muchos casos. A de *ahorro* es la palabra mágica.

28 La energía gris es el término técnico que designa la cantidad de energía generada por un producto antes y después de su uso real.

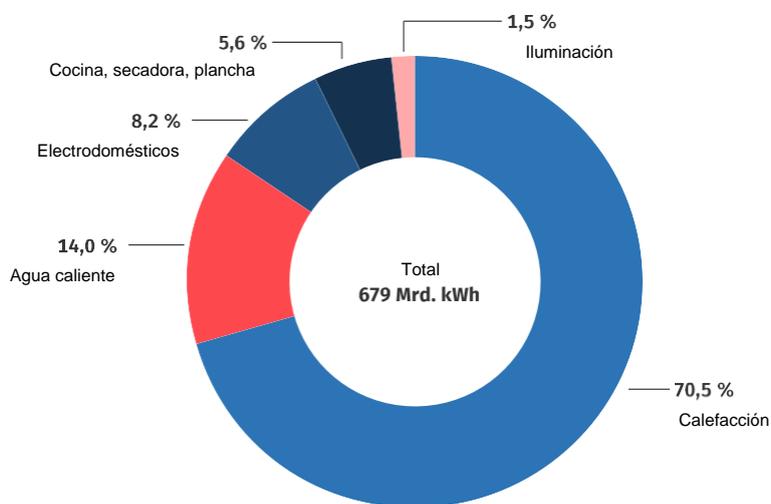
29 Todos los servicios en línea de nuestra electrónica de consumo causan en torno al 2% de las emisiones nacionales de CO₂ - tanto como todo el tráfico aéreo alemán [54]. Esta afirmación solo puede entenderse si se imagina la cantidad de servidores y ordenadores que funcionan en todo el mundo para poder ver un simple vídeo de YouTube. Todas estas salas de servidores y ordenadores necesitan refrigerarse mucho y constantemente, y la refrigeración requiere aún más energía que la calefacción.

Puedes reducir tu huella ecológica rápida y fácilmente prescindiendo de ciertos **artículos**. Sin embargo, si realmente necesitas *un *artículo**, seguro que puedes comprarlo usado en varios portales de anuncios clasificados y, por tanto, a menudo más barato y CO₂ - ¡gratis! Y si no encuentras lo que buscas, ahora hay muchas empresas y fabricantes que producen de forma sostenible y sin emisiones de CO₂ - pero ten cuidado con el "greenwashing" (ver más arriba).

(B) Vivienda y electricidad: 2,7 toneladas

Alrededor de una cuarta parte de la energía necesaria en Alemania cada año y las emisiones resultantes son atribuibles a la calefacción privada, el aire acondicionado³⁰, la generación de agua caliente y la electricidad [40]. La calefacción de nuestros hogares representa de nuevo la mayor parte de este consumo, como muestra claramente el sector azul oscuro de la siguiente figura. Sustituir los viejos sistemas de calefacción de gasóleo por un sistema de calefacción moderno y sostenible y aislar los apartamentos y casas más viejos puede, por tanto, reducir significativamente la huella de todos los residentes al mismo tiempo. Como esto es tan crucial para alcanzar los objetivos climáticos de Alemania, el Estado subvenciona actualmente estas medidas con grandes sumas (financiación del KfW).

Hogares privados: Consumo de energía 2017 en %



© Statistisches Bundesamt (Destatis), 2018

Figura 55 - Fuente: Oficina Federal de Estadística Destatis, 2018

30 La refrigeración requiere mucha más energía que la calefacción de los espacios vitales. Afortunadamente, prácticamente no hay sistemas de aire acondicionado instalados en los hogares alemanes, lo que significa que esta aplicación prácticamente no causa emisiones en los hogares particulares alemanes. Sin embargo, la situación es diferente en los edificios de oficinas o en regiones cálidas como California o Dubai..

La temperatura ambiente recomendada, que también se considera saludable, es de 18°C en la cocina, el aseo y el dormitorio, y de 20 °C en la sala de estar³¹. Así que ponte una capa más de ropa para reducir tu huella. Por otro lado, el potencial de ahorro en iluminación es comparativamente pequeño.³²

Independientemente de si el agua caliente se produce mediante una caldera eléctrica o se calienta eléctricamente: Cambiar a un proveedor de electricidad verdaderamente ecológico es probablemente una de las medidas con mejor relación coste-beneficio: ¡un hogar medio de cuatro personas puede ahorrar bastante más de una tonelada de CO₂ sin ningún esfuerzo!

(C) Movilidad: 2,1 toneladas

Los distintos medios de transporte difieren significativamente en sus emisiones de CO₂ - esto no es ninguna novedad. La siguiente tabla ofrece una visión general de cuanta emisión de CO₂ produce cada modo de transporte. Las emisiones directas se indican en gramos por kilómetro recorrido y pasajero. Para coches, e-cars y e-scooters, se asumió un pasajero. Los valores son una media redondeada de diversas fuentes, como la Agencia Europea de Medio Ambiente, Utopia, ADAC y la Agencia Federal de Medio Ambiente.

Medio de transporte	Avión	Coche	E-Coche	Ferrocarril	Autobús	Tranvía	E-Roller	Pe-delec	Bicicleta
gramos de CO ₂ por kilómetro y por persona	300	200	75 ³³	50	50	15	5	2	0

Como ya se ha mencionado en la sección de eficiencia de las páginas anteriores, estos valores medios varían considerablemente en función de la tecnología de propulsión instalada, el peso del vehículo y el número de pasajeros. Además, no todos los trenes funcionan con electricidad verde, lo que da lugar a un valor de emisiones comparable al del autobús.

31 Según el aislamiento y el tipo de calefacción, reducir la temperatura un grado ahorra entre un 5 % y un 10% de energía de calefacción y emisiones.

32 La Agencia Federal de Medio Ambiente ha recopilado en Internet consejos para reducir la huella en este ámbito: Información en alemán: <https://www.umweltbundesamt.de> → Umwelttipps für den Alltag → Heizen Bauen → Heizen y sobre la temperatura ambiente: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/heizen-bauen/heizen-raumtemperatur#unsere-tipps>

33 En el caso de los coches eléctricos, el rango va de 25 a 125 gramos de CO₂/km. El valor inferior se obtiene con un 100% de energía eólica y el superior con la actual combinación eléctrica alemana. Si a las emisiones directas añadimos ahora las emisiones derivadas de la producción de vehículos, todos los valores de la tabla anterior aumentan: para un coche convencional, una media de 20 gramos de CO₂/km y para los coches eléctricos, una media de 50 gramos de CO₂/km.

Sin embargo, el mayor ahorro de CO₂ puede conseguirse evitando viajar largas distancias siempre que sea posible. Unas vacaciones en Alemania, como muchos han experimentado durante el verano Corona de 2020, suponen un viaje menos estresante, pueden ser muy divertidas y ahorran más de 7 toneladas de CO₂ por persona en comparación con un vuelo a Bali.

(D) Nutrición: 1,7 toneladas

Existe un potencial inimaginable en el ámbito de la nutrición. Si solo tenemos en cuenta las emisiones causadas en Alemania, cada ciudadano alemán provoca por término medio alrededor de una quinta parte de sus emisiones a través de su alimentación: una media de 2 toneladas de CO₂ al año. Y esta cifra es más del doble si consideramos también las emisiones contaminantes causadas por el cultivo y la producción de nuestros alimentos fuera de Alemania.

Según los estudios, ¡la ganadería es responsable de entre el 20% y el 50% [41] de todas las emisiones de gases de efecto invernadero del mundo!

¿A qué se debe esta enorme proporción?³⁴ Los animales de granja necesitan mucho pienso. La soja se suele consumir como "pienso concentrado", que no se puede cultivar en tales cantidades en Alemania y, por tanto, no aparece en el balance nacional de emisiones. En Sudamérica, en particular, se talan enormes extensiones de selva virgen para plantar soja y luego transportar los granos ricos en proteínas por todo el planeta, con las consiguientes emisiones de CO₂. Como la transformación de la carne en otros países europeos suele ser más barata, también se necesita una cantidad considerable de energía para su refrigeración y transporte. El gas metano emitido por las vacas es mucho más perjudicial para el clima que el CO₂ y la producción de abono mineral para la alimentación animal también requiere una cantidad considerable de energía. ¿Sabías que el ganado en los pastos solo produce la mitad de metano que en los grandes establos?

Conclusión evidente: ¡reducir el consumo de carne y productos lácteos es una medida muy eficaz de protección del clima!

Segundo tornillo de ajuste: ¡utiliza ingredientes ecológicos regionales y de temporada! La agricultura ecológica requiere solo la mitad de energía que la convencional. Los alimentos no regionales y no estacionales producen emisiones superfluas debido a las largas rutas de transporte: 100 g de espárragos de Chile provocan 1,7 kg de emisiones de CO₂ solo durante el transporte, mientras que 100 g de espárragos de su propia región durante la temporada de espárragos ¡solo provocan 0,06 kg!

34 Sigue la argumentación de J.S. Foer en el apéndice de su libro "Somos el clima", publicado en 2019.

(E) Emisiones públicas: 0,9 toneladas

Las emisiones de CO₂ de este ámbito son generadas por todas las instituciones públicas, es decir, principalmente por las necesidades de electricidad y calefacción de museos, hospitales, escuelas, etc. Por tanto, el ahorro no es inmediato, pero tampoco imposible. La organización *Solar for Children*, por ejemplo, ayuda a los colegios a construir un sistema solar en el tejado de su propia escuela o en el barrio: ¡nada es imposible y no cuesta nada pedirlo!³⁵

Y como ocurre con todas las cosas que afectan al público, las cosas solo cambiarán en el ámbito de las emisiones públicas si los ciudadanos comprometidos (¿cómo tú?!) señalan las quejas y presionan a la administración local.

Ahora que ya conoces las cinco grandes áreas de actuación (de la A a la E), céntrate en algunas acciones concretas con gran potencial orientándote en tu huella personal de CO₂.

Mucho más que nuestras capacidades, son nuestras decisiones las que muestran quiénes somos realmente.

Joanne K. Rowling

Antes de pasar al punto 4 "¡Haz política!", he aquí dos reflexiones importantes sobre la inversión de capital y la oportunidad de compensar:

LA POSIBILIDAD DE COMPENSAR

No todas las emisiones pueden evitarse. La idea de la "compensación" se inventó para las emisiones inevitables. En general, la compensación solo debe realizarse como complemento del compromiso climático personal y no debe considerarse una indulgencia por los pecados climáticos. La idea que hay detrás:

Las plataformas de compensación como *Atmosfair*, *Klima-Kollekte* o *Primaklima* invierten en proyectos que pretenden evitar emisiones de CO₂ (por ejemplo, proteger y renaturalizar páramos y turberas³⁶) o ahorrar CO₂ (por ejemplo, cocinas más eficientes para preparar alimentos en países en desarrollo). Sin embargo, el precio de la compensación puede variar considerablemente en función del proveedor y, desafortunadamente, también de si se consigue realmente el efecto de compensación prometido. En noviembre de 2020 se publicó en Deutschlandfunk Kultur un artículo

³⁵ Información en www.solarfuerkinder.de

³⁶ Potencial de reducción de CO₂ - y metano: Fuente Europabuch: Los paisajes de turberas en las selvas tropicales corren peligro de secarse. Si esto ocurriera con las turberas de la cuenca del Congo, que tienen el tamaño de media Alemania, tendría consecuencias fatales para/sobre el clima. Se producirían emisiones adicionales de 30.000 Mt CO₂, lo que correspondería a las emisiones nacionales de CO₂ de los últimos 40 años.

extremadamente informativo sobre el tema de la compensación de CO₂ [42]. Si tiene dudas a la hora de decidirse por un proyecto de compensación, también puede ayudarle la recomendación de la Agencia Federal de Medio Ambiente, que califica los proyectos con el "Gold Standard" según las directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

INVERSIÓN DE CAPITAL

Aunque probablemente aún no tengas grandes cantidades en tu cuenta de ahorro, este punto es importante para el futuro y ¡quizá también para las conversaciones con tus padres! Porque de ti depende dónde inviertes tus ahorros y con qué seguro de pensiones contratas más adelante. Hay bancos, oportunidades de inversión y compañías de seguros que se comprometen con la sostenibilidad, los aspectos del bien común, el clima y la justicia social y, aun así, ofrecen tasas de interés comparables y buenas prestaciones. Hablando claro, sería fatal para tu propia huella de carbono vivir ecológicamente todo el año y, al mismo tiempo, fomentar consciente o inconscientemente la minería del carbón con miles de euros a través de acciones de participación. Ya hay bancos y fondos de inversión que se toman realmente en serio la protección del medio ambiente y la sostenibilidad. Busca en Internet el término "criterios ESG" como base para evaluar una inversión sostenible.

CONCLUSIONES:

La asociación *3 fürs Klima* propone tres medidas sensatas para maximizar el efecto protector del clima de tus propias acciones:

- ✓ Reduce tu *huella*
- ✓ *Compensa* el resto
- ✓ ¡amplía *la huella de tu mano*!

Si minimizas tu huella y compensas el resto de tus emisiones, vas por buen camino, pero aún estás muy lejos de alcanzar tu objetivo.



Ahora es el momento de hacer que la *huella* de tu mano sea lo más grande posible. A diferencia de tu huella, que puedes reducir a un máximo de cero, la huella de tus manos tiene el potencial de crecer hasta el infinito llevando a otras personas contigo en tu viaje y convenciénolas con entusiasmo.

*Los jóvenes y los niños ejercen una influencia sobre sus padres, otros adultos y la sociedad mucho mayor de lo que creen.
Usa esta influencia.*

- ? ¿Por qué se ha llegado a esta situación, en la que hoy nos vemos amenazados por una catástrofe climática?
- ? ¿Qué hacían tus padres por la protección del clima cuando tenían tu edad?
- ? ¿Qué hacen hoy?

Atrévete a hablar con tus amigos y familiares sobre la protección del medio ambiente y el clima, incluyendo temas como ¡la inversión y la planificación de las vacaciones!

Y con la ampliación de la huella de tu mano, llegamos a los dos últimos temas: "¡Haz política!" y "¡Juntos somos fuertes!".

5. ¡Haz Política!

¿La política es sólo para los políticos? ¿La cocina es sólo para los cocineros? Por supuesto que no. Las normas legales afectan a todo el mundo y son tan eficaces sobre todo por su amplio impacto: ¡incluso con cambios drásticos de comportamiento y acciones decisivas, ¡no podremos evitar que el mundo se derrumbe mientras nuestras medidas se limiten al ámbito personal!

¿Sabías que el Estado alemán gastó en 2012 alrededor de 57.000 millones de euros del dinero de los contribuyentes en forma de subvenciones perjudiciales para el medio ambiente y el clima? (Informe de la Agencia Federal de Medio Ambiente, [43].) Entre otras cosas, se subvencionó la minería del carbón y la industria automovilística y se apoyó el tráfico aéreo con 12.000 millones de euros (es decir, ¡más de 250 euros por contribuyente al año!). ¿Crees que el dinero de que dispone nuestra sociedad a través de los impuestos podría aprovecharse mejor? Entonces, ¡participa, expresa tu opinión y haz política!³⁷

Las normativas legales son necesarias, por ejemplo, para gravar la parafina y fijar así un precio adecuado a su nocividad para el clima. Ejemplos como la obligación de llevar cinturones de seguridad en los coches, la obligación de que los motoristas lleven casco o la ley de protección de los no fumadores³⁸ demuestran que incluso las normativas legales, que en un principio se perciben como restrictivas, son extremadamente sensatas y se convierten en parte de la vida cotidiana al cabo de poco tiempo. Y como ha quedado especialmente claro en los últimos años, la presión política de la población es sumamente importante para ello:

*¡Hay muchas áreas
donde puedes ser activo!*

Así es como puedes empezar:

- ✓ Analiza el programa europeo Green Deal:
https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
- ✓ ¿Qué objetivos y qué visión de Europa persigue el programa?
¿En qué se está trabajando?
- ✓ ¿Qué deben hacer las políticas de otros países de la UE para alcanzar los objetivos del "Pacto Verde"? ¿Y qué pueden hacer ustedes?
- ✓ Las firmas a favor de la protección del clima y el medio ambiente pueden tener un gran impacto. Algunos ejemplos de éxito en el pasado son los referendos contra la extinción de especies y el referéndum a favor de la protección de los no fumadores celebrado en Baviera en 2009³⁸.
- ✓ Por ejemplo, puedes encontrar a los representantes electos a través de www.abgeordnetenwatch.de. Ponte en contacto con ellos e involúcrate: ¡fueron elegidos para representarte!

³⁷ Por cierto, "política" no significa otra cosa que "concerniente al público en general".

³⁸ En 2009, el partido ÖDP inició el referéndum "Por una verdadera protección de los no fumadores". Alrededor del 14% de los votantes con derecho a voto votaron a favor, lo que dio lugar al referéndum "Protección de los no fumadores". En 2010, la mayoría de los 3,5 millones de votantes votaron a favor de la decisión, que introdujo la prohibición de fumar en restaurantes y cafés sin excepciones.

- ✓ Implicate en la democracia y la sociedad. Así podrás contribuir a dar forma a las cosas, asumir responsabilidades y experimentar cómo funcionan la política y la legislación en Alemania y cómo puedes participar en el proceso de toma de decisiones.

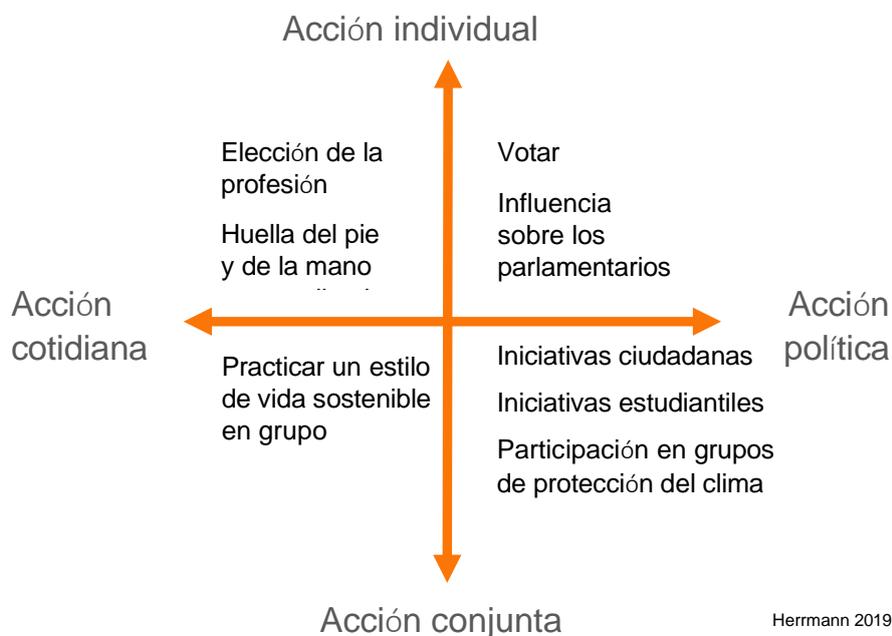
6. ¡Juntos somos fuertes!

No podrás salvar el mundo tú solo y es mucho más difícil alcanzar los objetivos que te has propuesto si no tienes la motivación de un grupo. Por lo tanto: ¡june fuerzas! Esto aumentará tu eficacia y dará a tus acciones la resistencia que necesitan.

¿Quieres algunos ejemplos?

- ✓ Crea un grupo de trabajo sobre protección del clima en tu centro de estudios.
- ✓ ¡Establece retos climáticos con tus amigos!
- ✓ Pide a tus profesores que traten el tema de la protección del clima en clase.
- ✓ Únete a movimientos locales, organizaciones ecologistas o de protección del clima. ¡Juntos, tu influencia política también crecerá!³⁹

El siguiente diagrama muestra varias áreas (y solo algunos ejemplos) en las que puedes actuar para aumentar tu huella de la mano de CO₂. Ten en cuenta que tus acciones individuales en la vida cotidiana solo representan una pequeña parte de tu influencia, ¡así que distribuye tu energía en las cuatro áreas!



³⁹ ONGs como Greenpeace, BUND, WWF o NABU, así como organizaciones sin ánimo de lucro, pueden ser el primer punto de contacto.

¡¿Está todo claro hasta ahora?! ¡Pues empecemos! Aquí tienes cinco retos para empezar:

Reto 1: ¡Mira dos documentales y lee un libro sobre el cambio climático!

Reto 2: Reduce tu consumo de carne y productos lácteos.

Reto 3: Haz a tus padres alguna de las siguientes preguntas:

"¿Cómo te involucraste en la protección del clima cuando tenías mi edad?".

"¿Cuál es tu contribución hoy para mantener nuestro planeta habitable?"

"¿Qué proveedor de electricidad tenemos?"

"¿Qué tipo de sistema de calefacción hemos instalado?"

"¿Está bien aislada nuestra casa?"

"¿Por qué no tenemos un sistema solar en el tejado?".

Reto 4: Llama a tu banco, seguro médico o plan de pensiones y pregúntales dónde invierten tu dinero. Por ejemplo, ¿puede asegurarse de que no se invierte en la minería del carbón?

Reto 5: ¡Únete al grupo de trabajo sobre protección del clima de tu centro! ¿No hay ningún grupo de trabajo sobre protección del clima? Entonces crea un grupo de trabajo sobre protección del clima con tus amigos.

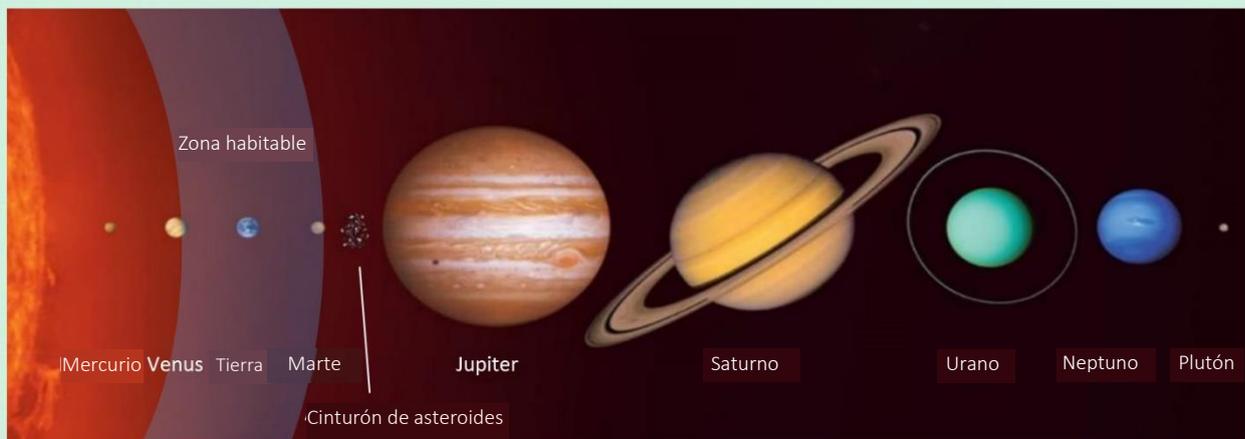
Reto 6: Presta atención a los medios de transporte. Intenta desplazarte en bici, a pie o compartiendo coche. Casi el 70% de las emisiones de CO₂ de un centro escolar se deben a los desplazamientos de ida y vuelta.

Actividad 1 – La Tierra en el Sistema Solar

¿Qué hace de nuestra Tierra un planeta habitable?

Antecedentes:

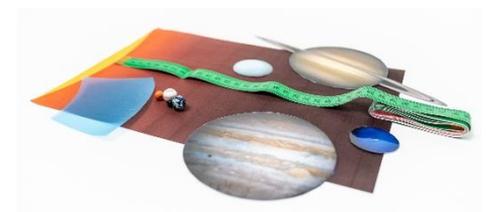
La Tierra, al igual que Mercurio, Venus y Marte, es uno de los planetas rocosos interiores del Sistema Solar. A los planetas rocosos interiores les siguen el cinturón de asteroides (con unos 650.000 asteroides) y los cuatro gigantes gaseosos Júpiter, Saturno, Neptuno y Urano, así como muchos planetas enanos como Plutón. Alrededor de todas las estrellas, y por tanto alrededor de nuestro Sol, existe la llamada zona habitable, un área en la que puede existir agua en estado líquido. La Tierra y Marte están situados en la zona habitable, pero solo la Tierra es habitable, ¿Por qué?.



Los planetas de nuestro Sistema Solar en escala de tamaño. Sin embargo, ¡la escala de distancias es mucho más pequeña! (Fuente: Scorza)

Materiales:

- ✓ Imagen de fondo con el contorno del Sol
- ✓ Modelos de planetas rocosos hechos en madera
- ✓ Modelos de planetas gaseosos laminados, cortados individualmente
- ✓ Zona habitable (película transparente azul)
- ✓ Cinta métrica



Materiales para la actividad

Ejecución:

Parte 1: ¿Dónde se ubica la Tierra en el Sistema Solar?

La distancia del Sol a la Tierra es de unos 150 millones km (esta distancia se define como la *Unidad Astronómica* (UA)). En nuestro modelo, comprimimos esa distancia a 10 cm. El radio del disco amarillo brillante corresponde entonces a 1 UA. La zona habitable en nuestro Sistema Solar está representada por la película transparente azul de 6 cm².



Detalles del Sol (Créditos: Scorza)

→ Introduce en la tabla las distancias de los planetas al Sol y la posición de la zona habitable a la escala del modelo.

Planeta	Distancia al Sol en UA	Distancia en el modelo en cm
Mercurio	0,4	
Venus	0,7	
Tierra	1,0	10
Marte	1.5	
Júpiter	5,2	
Saturno	9,5	
Urano	19,2	
Neptuno	30,1	
Zona habitable (borde interior)	0,85	

→ Coloca el disco amarillo claro en el suelo y coloca las esferas planetarias, la zona habitable y los gigantes gaseosos a la distancia correcta a lo largo de una línea en el suelo.

Nota: ¡El tamaño de los planetas y del Sol es mucho más grande en comparación con las distancias en este modelo! En la escala correcta, la Tierra debería colocarse a más de 100 metros de distancia del Sol. Sin embargo, la escala entre los planetas y el Sol es correcta.

Parte 2: ¿Qué papel juega la masa en la habitabilidad de la Tierra?

¿Dónde está ubicado el modelo de la Tierra respecto a la zona habitable?

Sitúa ahora a Marte en el lugar de la Tierra. Analiza si Marte sería habitable en ese caso. Compara la masa de Marte ($6,4 \cdot 10^{23} \text{ kg}$) con la de la Tierra ($5,9 \cdot 10^{24} \text{ kg}$) y considera cómo la densidad de la atmósfera del planeta está relacionada con su masa (y gravedad). Piensa en nuestra Luna ($m = 7,35 \cdot 10^{22} \text{ kg}$). ¿Hay atmósfera en ella?



Comparación entre la Tierra y Marte (Créditos: NASA)

Actividad 2 – La Tierra está irradiada

Parte 1: ¿Por qué la Tierra no se calienta cada vez más, aun cuando está constantemente expuesta al Sol?

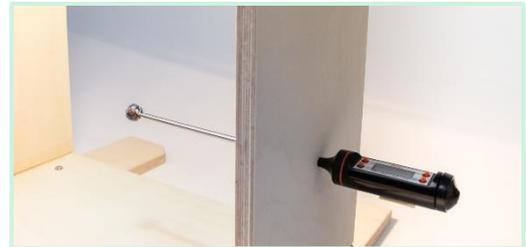
Antecedentes:

Cuando un cuerpo frío se calienta por una fuente de energía radiante, el propio cuerpo irradia cada vez más energía en forma de radiación térmica. En algún momento absorbe la misma cantidad de energía por segundo que la que irradia: es cuando el cuerpo se encuentra en equilibrio radiativo y ha alcanzado la *temperatura de equilibrio*. Al igual que todos los planetas del Sistema Solar, la Tierra es irradiada por el Sol. ¿Se encuentra la Tierra en equilibrio radiativo?



Materiales:

- ✓ Bombillo incandescente
- ✓ Modelo de globo terráqueo
- ✓ Termómetro digital
- ✓ Cronómetro

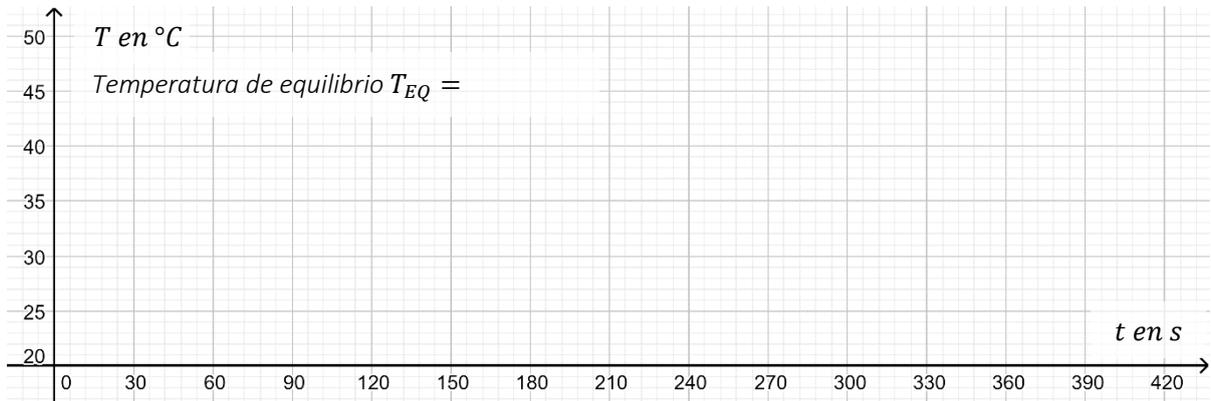


Ejecución:

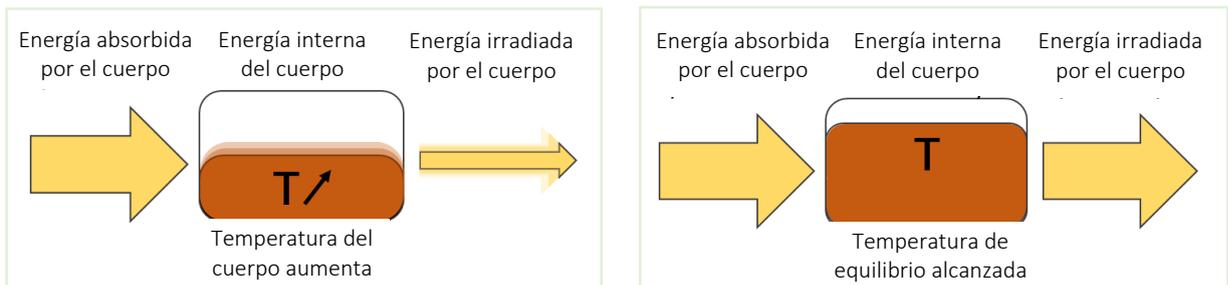
- Toma el modelo de la Tierra e inserta el termómetro digital en la pequeña abertura de un lado.
- Coloca la Tierra directamente debajo del bombillo para que reciba la mayor intensidad de radiación.
- Mide la temperatura de la tierra cada 20 segundos durante seis minutos. Anota los resultados de la medición en la tabla

Tiempo s	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
T en °C										
Tiempo s	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380
T en °C										

→ Muestra los resultados gráficamente en el diagrama:



→ Analiza los resultados y explica por qué la temperatura del modelo de la Tierra no continúa aumentando. Utiliza las dos figuras siguientes para su análisis e interpretación. Utiliza los términos *temperatura de equilibrio* y *radiación de equilibrio*.



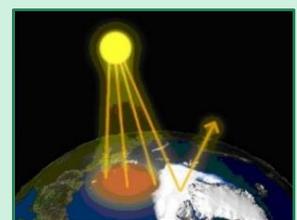
Venus está más cerca del Sol que la Tierra. ¿Qué ocurriría con la temperatura de la Tierra si se moviera al lugar donde se encuentra Venus (o Marte)?



Parte 2: ¿Qué papel juegan las superficies de hielo en la temperatura de la Tierra?

Antecedentes:

Las superficies brillantes de la Tierra, tal como el hielo y la nieve, reflejan la luz incidente del Sol con más intensidad que, por ejemplo, el agua o el suelo. Esta reflectividad de una superficie se llama *albedo* α (lat. "blanco"). Para la Tierra, $\alpha = 0,3$. Esto significa que 30% de la energía de la radiación incidente es reflejada y no contribuye al calentamiento. La pérdida de espacio blanco debido al calentamiento global tiene efectos devastadores sobre el clima de la Tierra.



Albedo de la Tierra

Materiales:

- ✓ Bombillo incandescente
- ✓ 2 cuerpos de papel (impresos uno como roca, uno como superficie de hielo)
- ✓ 2 termómetros digitales
- ✓ Cronómetro



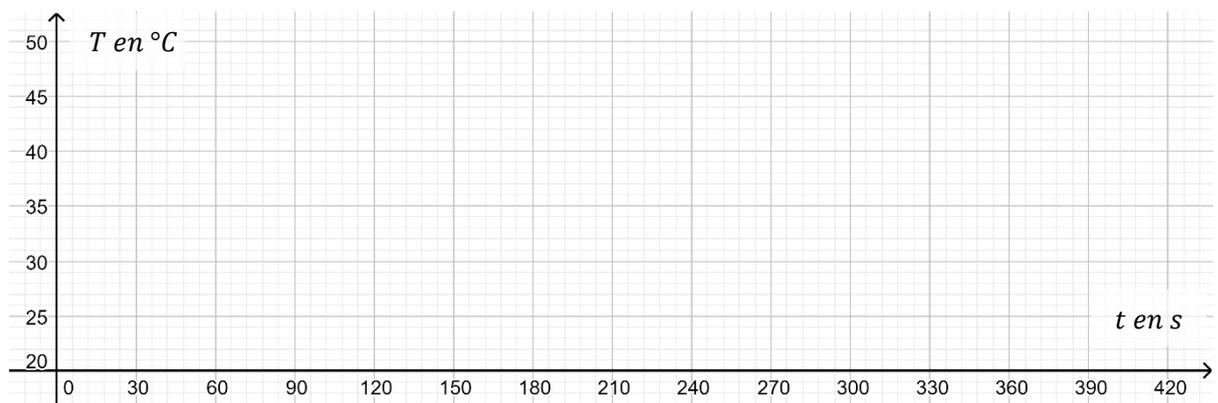
Experimento sobre el albedo

Ejecución:

- Inserta los dos termómetros en los cuerpos de papel doblado. Uno representa las rocas debajo de un glaciar derretido, el otro la superficie intacta de hielo. Ambos cuerpos de prueba se colocan bajo el bombillo encendido tal que sean irradiados con la misma intensidad.
- Mide la temperatura de los dos cuerpos de papel cada 20 segundos y anota los resultados en la tabla.

Tiempo in s	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300	320	340	360	
Temperatura oscuro en °C																				
Temperatura blanco en °C																				

- Muestra los resultados gráficamente en el diagrama. Usa diferentes colores para cada conjunto de datos.



- Analiza los resultados y explica las diferentes curvas de temperatura. Utiliza los términos *albedo*, *temperatura de equilibrio* y *radiación de equilibrio*.
- Analiza los efectos del hielo derretido y los glaciares en la temperatura de la Tierra. ¿Cuáles son los efectos del derretimiento actual de los casquetes polares?

Actividad 3 – The Tierra, un planeta radiante

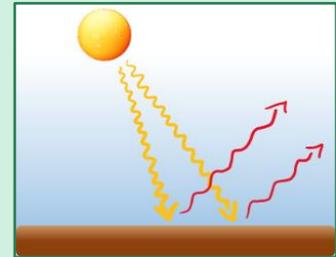
Parte 1: ¿Podemos hacer visible la radiación térmica de la Tierra?



Cecilia Scorza y
Moritz Strähle

Antecedentes:

La energía se transporta del Sol a la Tierra via ondas electromagnéticas. La mayor parte de la radiación solar consiste de ondas electromagnéticas de onda corta (luz visible para nosotros), las cuales llegan al suelo casi sin obstáculos desde la atmósfera, para luego ser en gran medida absorbidas. La superficie de la Tierra irradia al Espacio la energía solar recibida como energía térmica en forma de radiación infrarroja (de gran longitud de onda). En total, la Tierra absorbe tanta energía solar como la que irradia al Espacio en forma de radiación térmica, es decir, se encuentra en *equilibrio radiativo*. La radiación térmica de la Tierra es invisible para nosotros. ¿Es posible hacerla visible y estudiarla?



Radiación solar de onda corta (amarillo) y radiación infrarroja de onda larga (rojo). (Créditos: [^](#))

Materiales:

- ✓ Cámara termográfica



Ejecución:

No solo la Tierra, sino todos los cuerpos emiten radiación térmica. En este caso, se aplica lo siguiente: cuanto más caliente está un cuerpo, más intensa es la radiación térmica. Una cámara termográfica "convierte" esta radiación térmica en luz visible, de modo que se puede ver en la pantalla.

- Observa con la cámara termográfica a personas sin y con gafas. ¿Qué puedes observar? ¿Qué partes de la cara están más calientes y cuáles más frías?
- ¡La radiación térmica también se puede sentir! Toca con cuidado una taza de té u otro objeto caliente; obsérvalo también con la cámara termográfica.
- Frota las palmas de tus manos con fuerza durante cinco segundos y luego presiona las manos durante cinco segundos contra la mesa. Observa el lugar con la cámara termográfica después de retirar las manos. Explica cómo se genera la imagen y por qué desaparece. Frota el suelo con los pies. ¿Qué ves?

Establece una conexión entre la desaparición de la huella de la mano y la superficie terrestre que emite radiación. ¿Por qué no se sigue enfriando la superficie terrestre?

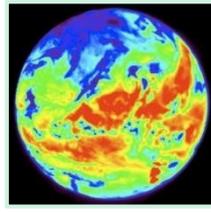
Observa las siguientes imágenes: a) de la Tierra y b) del Sol. ¿Tienes alguna idea de lo que muestra la imagen c)?



a) Tierra



b) Sol

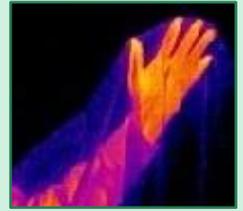


c) ?

Parte 2: ¿Cuáles materiales son transparentes a la luz visible, cuáles a la radiación infrarroja?

Antecedentes:

La luz visible y la radiación infrarroja tienen diferentes propiedades. Algunos materiales son transparentes a la radiación infrarroja (radiación IR) pero no la luz visible. Otros materiales absorben (es decir, atrapan) la radiación infrarroja y permiten que la luz visible pase sin obstáculos. Exploremos estas propiedades.



Materiales:

- ✓ Cámara termográfica
- ✓ Papel negro, globo lleno de aire, globo lleno de agua
- ✓ Película transparente
- ✓ Cápsula de Petri de vidrio
- ✓ Papel y cuaderno



Materiales para la exploración de la radiación IR

→ Usa tu mano como un radiador infrarrojo y obsérvala a través de los diferentes materiales con tus ojos (detector de luz visible) o la cámara termográfica (detector de radiación IR), para determinar la transparencia de diferentes materiales a la radiación infrarroja y la luz visible. Completa la tabla.

Material	Transparente a la luz visible	Transparente a la radiación IR
Vidrio		
Papel negro		
Papel		
Globo lleno de aire		
Globo lleno de agua		
Cuaderno		
Película transparente		

Los gases de efecto invernadero de la atmósfera dejan pasar la luz visible casi sin impedimentos, pero absorben la radiación infrarroja. ¿Cuál de los materiales estudiados también presenta estas propiedades?

Actividad 4 – Las claves de la Temperatura de la Tierra

¿Qué influencia tienen los gases de efecto invernadero sobre la temperatura de la Tierra?

Antecedentes:

En promedio, la superficie de la Tierra es irradiada con 340 W/m^2 (“vatios por metro cuadrado”) en un día. Aproximadamente 30% de la radiación solar que llega al suelo se refleja al Espacio, por ejemplo, por superficies de hielo y nubes blancas; el resto de la energía es absorbida (recolectada) por la superficie de la Tierra y luego irradiada como radiación térmica en el infrarrojo, invisible al ojo humano. La cantidad de energía emitida es igual a la cantidad de energía recibida, es decir, la Tierra está en *equilibrio radiativo*.



La Tierra es irradiada por el Sol y ella misma irradia

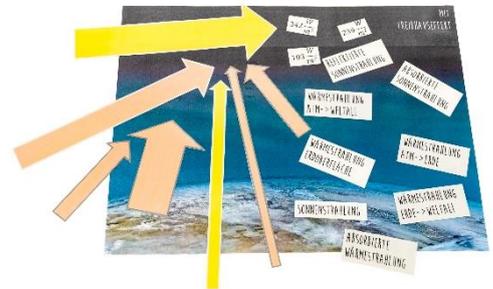
Usando la *ley de Stefan-Boltzmann*, podemos estimar la temperatura promedio de la Tierra. La ley describe la intensidad de la radiación I (en vatios por m^2) a la cual un cuerpo con temperatura T irradia:

$$I = \sigma \cdot T^4$$

σ (sigma) es una constante que “convierte” temperatura en intensidad, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$. Mientras más caliente un objeto, más radiación emite, proporcional a la cuarta potencia de su temperatura. Así, si se duplica la temperatura de un objeto, éste irradia $2^4 = 16$ veces más energía por segundo! ¿Qué temperatura habría en una Tierra sin atmósfera?

Materiales:

Flechas y etiquetas de colores para visualizar
Hojas tamaño A3: Tierra con y sin atmósfera



Parte 1: ¿Cuál sería la temperatura promedio en una Tierra sin atmósfera?

Ejecución:

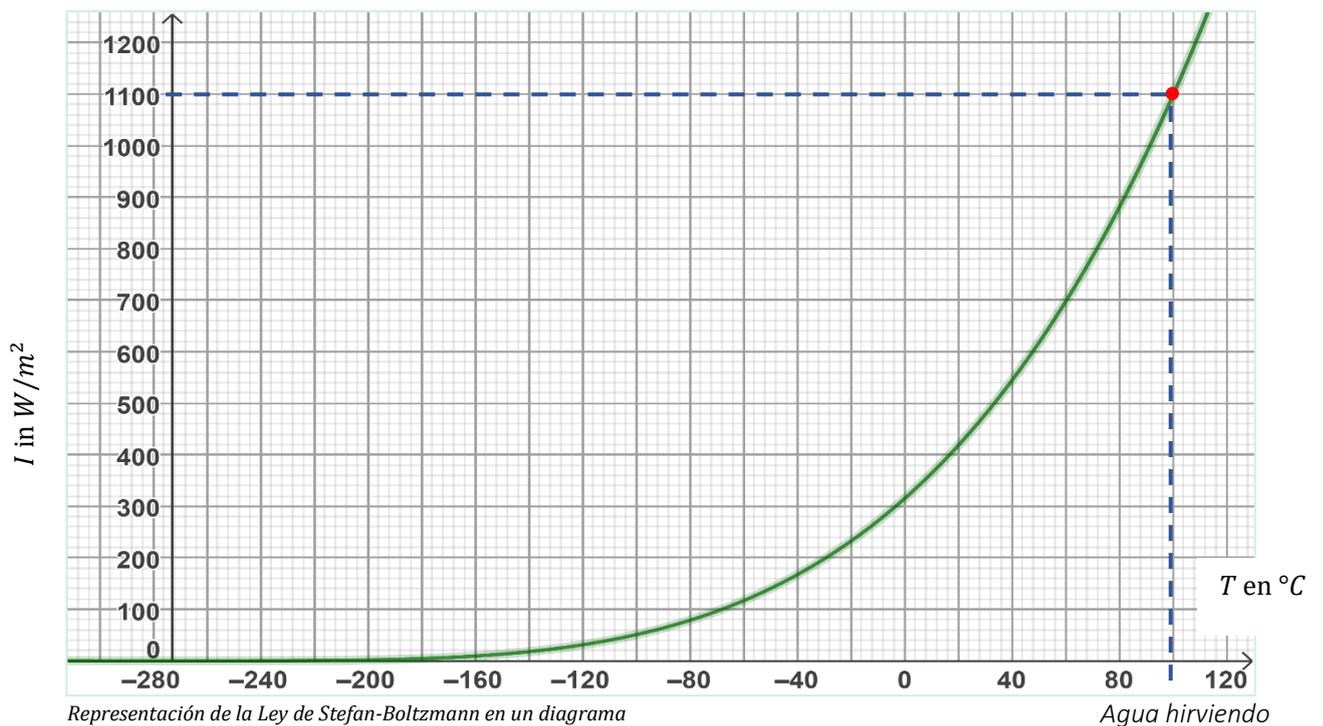
- Ubicación de las flechas: Coloca las flechas con bordes y letreros gris claro sobre la hoja: “Tierra sin atmósfera” para que coincidan con el texto de fondo.
- En el diagrama en la página siguiente, encontrarás una representación gráfica de la ley de Stefan-Boltzmann. ¡Vamos a familiarizarnos con ella! Primero completa los valores (estimados) de la temperatura que faltan en la tabla y luego indícalos en el diagrama. Lee en el diagrama los valores de la intensidad de la radiación correspondiente a la temperatura de los objetos y anótalo en la tabla. Sigue el ejemplo del agua hirviendo.

Objeto	Temperatura °C	Intensidad W/m ²
Agua hirviendo	100	1100
Cuerpo humano		
Temperatura ambiente		
Cubos de hielo		

→ Si colocaste y asignaste las flechas y etiquetas correctamente, sabrás que en promedio la Tierra absorbe 238 W/m² de radiación solar y vuelve a irradiar esta energía (*equilibrio radiativo*). Utiliza ahora el diagrama de forma inversa para determinar la temperatura media de una Tierra que irradia radiación infrarroja con esta intensidad, y señálalo en el diagrama.

Interpreta el resultado y compáralo con la realidad: ¿Es posible conciliar la temperatura media de la Tierra que has determinado con tus experiencias? ¿Cuál es la razón para esto?

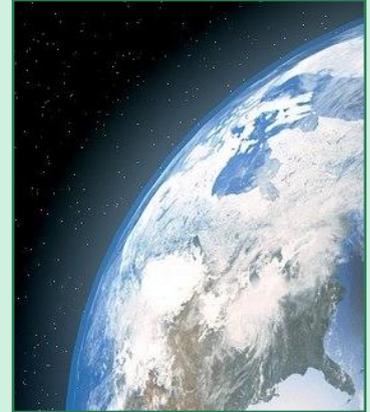
Una pregunta adicional, no fácil de responder: ¿Tienes alguna idea de por qué sería mucho más fría una Tierra sin atmósfera?



Parte 2: ¿Qué impacto tiene sobre la temperatura de la Tierra el efecto invernadero natural?

Antecedentes:

Sin una atmósfera, haría mucho frío de la Tierra. Pero, ¿cómo nuestra atmósfera asegura temperaturas agradables sobre la Tierra? La luz del Sol puede atravesar la atmósfera casi sin obstáculos. Por otro lado, asumimos que la superficie de la Tierra es irradiada por el Sol en promedio con 340 W/m^2 , 30% de los cuales son reflejados directamente de vuelta al Espacio y el resto son absorbidos por la superficie de la Tierra. En lo que sigue, suponemos que 76% de la radiación térmica emitida por la superficie calentada de la Tierra es absorbida por la atmósfera; el resto, 24%, se va sin obstáculos de vuelta al Espacio. La atmósfera calentada por esta radiación térmica absorbida, irradia a su vez radiación térmica: la mitad hacia el Espacio y la otra mitad hacia el suelo.

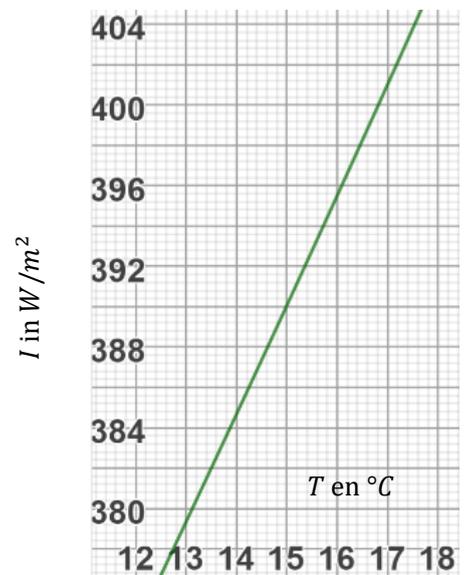


Tierra sin atmósfera

Ejecución:

- Ubicación de las flechas: Estudia el texto con los antecedentes y coloca las flechas con bordes gris claro y gris oscuro en la hoja “Tierra con atmósfera”.
- La atmósfera es así una segunda fuente de radiación (además del Sol), la cual, usando nuestras suposiciones, emite energía hacia el suelo con una intensidad de 147 W/m^2 . Esta energía es absorbida adicionalmente por el suelo, que ahora debe irradiar de nuevo con mayor intensidad para permanecer en *equilibrio de radiación*. ¿Cuál es el valor de esta intensidad de radiación y cuál es la temperatura del suelo para ello? Utiliza el diagrama de la derecha, que es una ampliación del diagrama anterior.

Sugerencia: Suma las dos intensidades de radiación absorbidas por la superficie de la Tierra.



Parte 3: ¿Cuán fuerte es el efecto invernadero antropogénico?

Antecedentes:

¡El efecto invernadero natural asegura temperaturas placenteras y que la vida pueda existir en la Tierra! Pero ahora entra en juego el ser humano: debido a la fuerte emisión de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono o el metano, una proporción cada vez mayor de la radiación infrarroja de la Tierra es absorbida por la atmósfera.



Emisión de gases de efecto invernadero

En el siguiente ejemplo suponemos que la atmósfera absorbe un poco más de radiación de la Tierra: 78% en lugar de 76%. Como consecuencia se calienta más y por lo tanto también irradia con mayor intensidad. En este caso, correspondería a 6 W/m^2 adicionales. ¿Cuál es la temperatura media de la Tierra con esta fuente de energía adicional que irradia la Tierra?

Información: El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) utiliza modelos computacionales para proporcionar escenarios posibles para el clima futuro. Los escenarios varían de RCP 2.6 a RCP 8.5 (RCP, son las siglas en inglés de Trayectoria de Concentración Representativa), cuya cifra indica una intensidad de radiación adicional desde la atmósfera hacia la superficie de la Tierra de 2.6 W/m^2 y 8.5 W/m^2 , respectivamente.

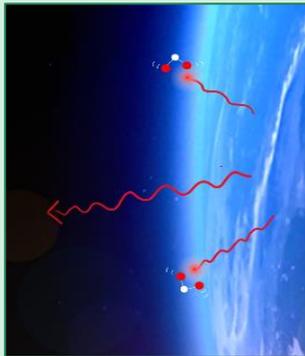
Actividad 5 – El efecto de los gases de efecto invernadero



Cecilia Scorza y
Moritz Strähle

¿Cómo afectan los gases del efecto invernadero la temperatura de la Tierra?

Antecedentes:



Absorción de radiación IR por gases de efecto invernadero

La atmósfera de la Tierra se compone principalmente de nitrógeno (78 %) y oxígeno (21 %). Los gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (0,04 %) y el metano (0,0002 %) están presentes solo en cantidades ínfimas, ¡pero tienen un impacto importante! Las moléculas de los gases de efecto invernadero absorben la radiación infrarroja invisible emitida por la superficie de la Tierra y vibran. Una parte de esta energía vibratoria se transfiere a las partículas del entorno en forma de energía cinética: ¡la atmósfera se calienta! ¿Qué ocurre con la temperatura de la atmósfera cuando las personas liberan grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera mediante la quema de combustibles fósiles?

Dos experimentos modelo sobre la absorción de la radiación térmica por el CO₂

Los dos experimentos siguientes muestran que el CO₂ absorbe la radiación térmica de dos maneras diferentes .

Materiales:

- ✓ Radiador infrarrojo de cerámica en cesta protectora (representa la superficie de la Tierra)
- ✓ Cilindro de cartón en soporte de madera
- ✓ Tapones, film transparente y gomas elásticas
- ✓ Termómetro digital
- ✓ Matraz Erlenmeyer con tapón y tubo
- ✓ Bicarbonato de sodio, ácido cítrico y agua
- ✓ Cámara termográfica y trípode



Experimento con modelos sobre la absorción de la radiación térmica

¡Atención! Emisor muy caliente: ¡riesgo de quemaduras! Productos químicos: ¡Utilizar gafas de protección!

Preparación:

- Atornilla el radiador infrarrojo de cerámica con el soporte de madera a las patas del marco de madera dobladas hacia arriba. Encaja el soporte de madera para el cilindro de cartón en los dos orificios hasta el tope (ver la imagen).

- Sella los extremos del cilindro de cartón con film transparente y las bandas de goma elástica y, a continuación, fija el tubo de cartón al soporte de madera con gomas de manera que la distancia entre el radiador de infrarrojos y la lata sea de 8 cm.
- Introduce el termómetro en el pequeño orificio del centro (de modo que la punta quede en el centro del tubo) y sella los dos orificios grandes (de entrada de CO₂ y salida de aire) con un tapón cada uno.
- Enciende el radiador infrarrojo. Mientras el emisor se calienta, lee atentamente el texto de los antecedentes y relaciona las partes del experimento (izquierda) con sus equivalentes en la realidad (derecha):

Aire en el cilindro de cartón

Radiador infrarrojo de cerámica

CO₂ producido en el matraz Erlenmeyer

Gases adicionales de efecto invernadero

Atmósfera terrestre con concentración normal de CO₂

Superficie de la Tierra

Espera hasta que la temperatura en el cilindro de cartón no cambie en un lapso de tiempo de 30 segundos y puedas asumir que se ha alcanzado la *temperatura de equilibrio* (aprox. 27 °C). ¡Anota ese valor! Esto puede tardar hasta 25 minutos si el radiador aún no se ha calentado.

- En cuanto se alcanza la temperatura de equilibrio, se añade CO₂ al tubo de cartón en el siguiente paso (ejecución).
- Durante el tiempo de espera: Utilizando el póster de la actividad 5, discute cómo los gases de efecto invernadero, como el CO₂, absorben la radiación térmica y convierten la energía de radiación absorbida en energía vibratoria. ¿Pueden las moléculas de nitrógeno y oxígeno absorber también la radiación térmica de forma similar y hacerla vibrar? ¿Cuál es la diferencia entre ellos y el CO₂ y el H₂O?

Nota:

- Inicia los experimentos cuando se alcance la temperatura de equilibrio. Anótala antes de continuar

Parte 1: La radiación infrarroja es interceptada - experimento de transmisión

Ejecución:

- Para este experimento, abre con cuidado la cesta protectora (¡riesgo de quemaduras!) para que no haya ninguna rejilla entre el radiador de infrarrojos y el tubo de cartón. Fija la cámara termográfica al trípode de forma que la radiación térmica incida en la abertura de medición de la cámara termográfica a través del tubo de cartón y la cruz del objetivo quede sobre el radiador térmico.
- Complemento para cámaras termográficas con escala de temperatura fija (p. ej. FLIR Experiment: Absorción de radiación térmica I C3-X): Ajusta la escala de temperatura a manual, fija el



Experimento: Absorción de radiación térmica

límite superior (temperatura máxima del calentador radiante) y, a continuación, ajusta el límite inferior aprox. 20 °C por debajo de este.

- Observa la indicación de temperatura (y eventualmente la imagen visible) de la cámara termográfica al introducir CO₂ en el tubo de cartón. Al mismo tiempo, puedes medir la temperatura con el termómetro colocado en el centro (ver parte 2).

Introducción de CO₂:

- Mezcla dos cucharaditas de bicarbonato de sodio y una de ácido cítrico en el matraz Erlenmeyer (sin agua)
- Retira los dos tapones del cilindro de cartón
- A continuación, introduce el tubo por uno de los orificios, añade unos 30 ml de agua a la mezcla de ácido y bicarbonato y coloca rápidamente el tapón grande con el tubo en el matraz Erlenmeyer. Gira ligeramente el matraz Erlenmeyer para que el CO₂ se canalice hacia el interior del cilindro. Esto debería tardar aproximadamente un minuto y medio.
- Retira el tubo del cilindro y, al mismo tiempo, vuelve a cerrar rápidamente los dos orificios con los tapones pequeños. La concentración de CO₂ en la lata ha aumentado significativamente.
- Observa la temperatura medida durante los siguientes minutos y espera hasta que se mantenga de nuevo una temperatura constante. Anota su valor y compáralo con la temperatura anterior.

Tarea:

- ¡Interpreta el resultado! Ten en cuenta que la cámara termográfica calcula de temperatura de un objeto utilizando la radiación térmica emitida (Ver la Actividad 4 - Ley de Stefan-Boltzmann).

Parte 2: Medición del aumento de temperatura en el cilindro de cartón

Ya sabes, por el experimento de transmisión, que la radiación térmica se absorbe en el cilindro de cartón, ahora puedes preguntarte qué ha cambiado dentro del cilindro de cartón. Para ello se utiliza el termómetro colocado en el centro del cilindro de cartón.

Ejecución:

- Registra la temperatura que aparece en el termómetro de varilla después de introducir el CO₂. Compárala con la temperatura de equilibrio de la primera parte. ¡interpreta el resultado!



Tarea:

- ? La concentración de CO_2 en la atmósfera se mide en partes por millón (ppm), indica cuántas moléculas de CO_2 contiene un millón de moléculas de aire seco. Busca en Internet “NASA CO_2 ” e investiga la concentración actual de CO_2 en la atmósfera. Compárala con los valores históricos de los últimos 800,000 años que aparecen en la figura.



- ? ¿A qué se debe la concentración de gases de efecto invernadero observada desde el siglo XIX? ¿Qué relación guarda el experimento con estos datos? Resume tus conclusiones en dos oraciones.



Los autores Cecilia Scorza-Lesch y Harald Lesch experimentando. Fuente: Lo más destacado de Física 2022

Actividad 6 – El aumento del nivel del mar



Cecilia Scorza
y Moritz Strähle

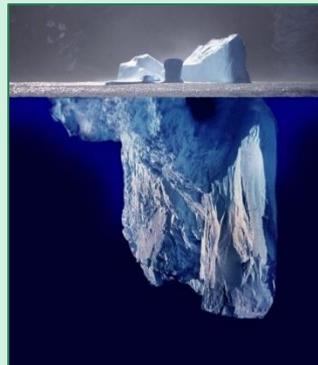
¿Cómo contribuye el cambio climático al aumento del nivel del mar?

Antecedentes:

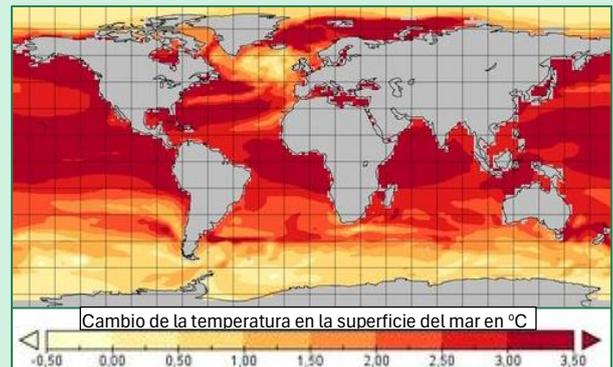
Debido al calentamiento global, hoy en día se están derritiendo grandes masas de hielo en tierra firme, como la capa de hielo de Groenlandia o los glaciares de los Alpes. La temperatura del agua de los océanos también está aumentando. Esto implica que los icebergs que flotan en el agua se derriten más rápidamente.



Glaciares de Groenlandia
(Fuente: Wikipedia)



Fotomontaje de un iceberg
(Crédito: Uwe Kils)



Comparación de la temperatura media 2070-2099 con respecto a 1961-1990 en el escenario RCP8.5 (fuente: wiki.bildungserver.de)

Materiales:

Bombillo incandescente
Dos vasos de precipitado de 150 ml
Pingüino y oso polar de hielo
Dos piedras planas
Rotulador soluble en agua
Matraz de Erlenmeyer
Tapón de goma con tubo de vidrio



Experimentos sobre la crecida del nivel del mar

Experimento 1: ¿Está aumentando el nivel del mar debido al derretimiento de los icebergs?

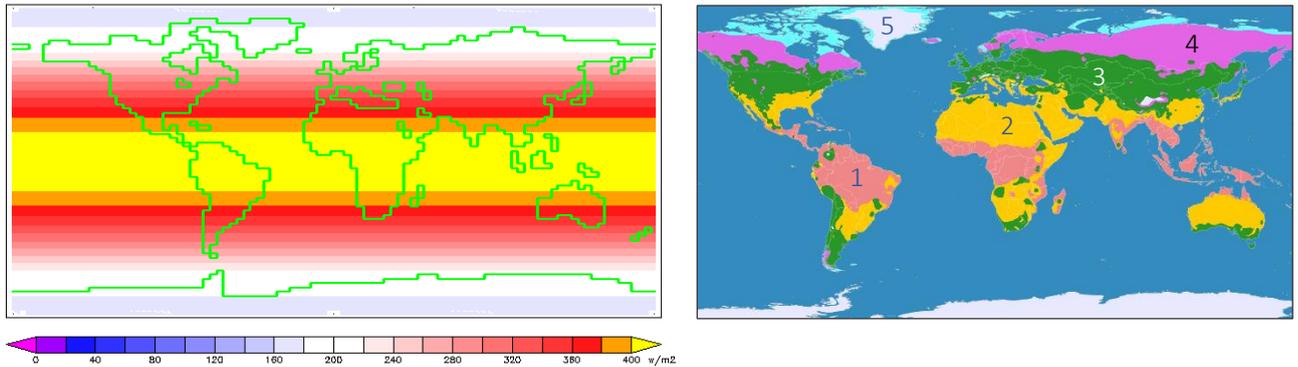
→ Coloca las piedras en uno de los vasos de precipitados. Llena el vaso de forma que sólo la primera piedra quede bajo el agua y llena el otro con unos 80 ml de agua fría. A continuación, coloca un cubo de hielo sobre las piedras, deja que el otro flote en el otro vaso; coloca ambos vasos bajo el foco. ¡Marca al instante el nivel del agua con el rotulador! Continúa con el siguiente experimento.

Experimento 2: ¿Está aumentando el nivel del mar debido al calentamiento del agua?

- Llena el matraz con agua y ciérralo con el tapón de goma y el tubo de vidrio de forma que el agua del tubo llegue hasta la mitad y no se formen burbujas de aire (puede ser necesario hacer algunas pruebas).
- Marca el nivel con el rotulador y calienta el agua del matraz con las manos durante unos minutos. Observa los cubitos de hielo mientras lo haces.
- Anota tus observaciones de ambos experimentos y describe en un breve resumen por qué sube el nivel del mar (y por qué no) debido al calentamiento global. Consulta también las imágenes del texto de apoyo y los resultados de los experimentos.

Análisis:

La figura de la izquierda muestra el valor medio anual de la radiación solar en la parte alta de la atmósfera en unidades de W/m^2 . La figura de la derecha muestra la división de la Tierra en nuestras cinco principales zonas climáticas.



Izquierda: Media anual de la radiación solar en el tope de la atmósfera. Derecha: Clasificación climática genética. (Fuente: izquierda: Wiliam M. Conolley; derecha: Wikimedia)

→ Asigna las siguientes zonas climáticas a los números del 1 al 5 y proporciona los valores aproximados de la radiación solar media para cada zona: Zona subpolar, Zona subtropical, Zona templada, Zona polar, Zona tropical.

→ Explica brevemente la relación entre la figura de la izquierda y la de la derecha.

Número	Zona Climática	Media de la radiación solar W/m^2
1)		
2)		
3)		
4)		
5)		

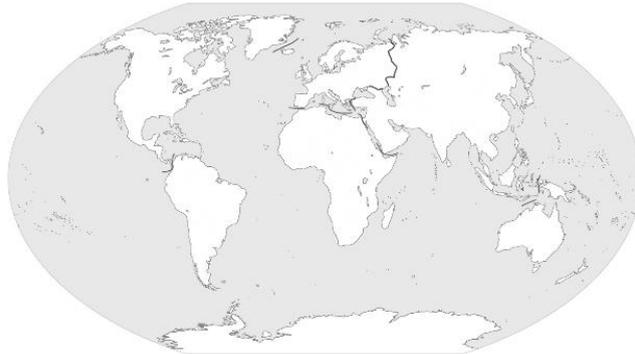
Parte 2: Impacto del cambio climático en las zonas climáticas y los ecosistemas

Sigue el código QR y lee el artículo sobre las consecuencias del cambio climático en las zonas climáticas y los animales que viven en ellas.



Análisis:

- Describe las consecuencias del cambio climático en las zonas climáticas de la Tierra. ¿Qué consecuencias tiene el cambio climático en los hábitats animales y qué problemas plantea?
- *Escenario futuro*: Esboza una posible distribución mundial de las zonas climáticas en 2100 en el mapamundi que aparece a continuación. Colorea las zonas climáticas según la marca de la Fig.2.



*Mapamundi (Fuente:
https://media.diercke.net/omeda/89090_Erde_Kontinente_und_Ozeane.pdf)*

Actividad 8 – Los océanos como amortiguadores del clima

¿Cómo nos protegen los océanos de un cambio climático aún mayor?

Antecedentes:

Aproximadamente dos tercios de la superficie de la Tierra están cubiertos por agua líquida, lo cual tiene un impacto en el clima de la Tierra. Esto se debe a que el agua es un almacén de calor muy eficaz: una cierta masa de agua puede absorber significativamente más energía por cada kelvin de aumento de temperatura que la misma masa de aire, o de tierra. Por ejemplo, un kilogramo de agua se calienta con un suministro de energía de 4,2 kJ por cada kelvin que incrementa su temperatura. Por lo tanto, el agua tiene una capacidad calorífica de 4,2 kJ/(kg·K). El aire y la tierra seca, en cambio, tienen una capacidad calorífica de aproximadamente 1 kJ/(kg·K). Por lo tanto, alrededor de un kilojulio es suficiente para calentar un kilogramo de estas sustancias en 1 K. El efecto invernadero provocado por el ser humano aporta energía adicional a la superficie terrestre. ¿Cómo afecta el agua de los océanos al calentamiento global?



Nuestra Tierra azul (NASA)

Materiales:

Globo lleno con agua
Vela de té y cerilla

Ejecución:

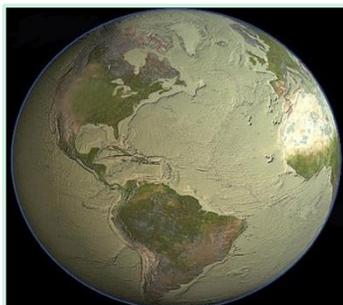
- ¿Hasta dónde te atreves a acercar el globo lleno de agua a la vela? ¡Acércate lentamente a la llama!
- Después de un rato, toca el globo desde abajo. ¿Se ha calentado mucho?



Globo lleno de agua sobre la vela

Análisis:

- Lee el texto con los antecedentes y explica tus observaciones.
- El efecto invernadero provocado por el hombre añade energía adicional a la atmósfera. Explica por qué sin nuestros océanos el impacto sería aún más drástico de lo que ya es hoy. ¿Cuál de estas dos Tierras tendría una temperatura superficial más alta?



Tierra seca (Créditos: Cook, Nieman, USGS)



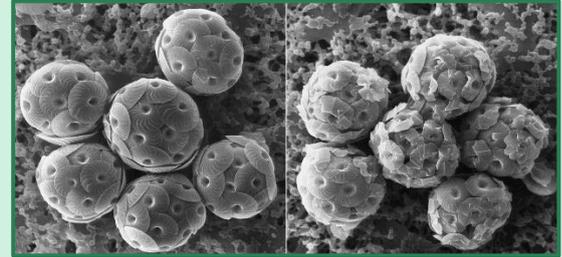
La perla azul (Créditos: NASA)

Actividad 9 – La acidificación de los océanos

¿Por qué el CO₂ acidifica los océanos y cuáles son las consecuencias?

Antecedentes:

Las mediciones del valor del pH en los océanos muestran una creciente acidificación del agua. Si aumenta el contenido del gas CO₂ de efecto invernadero en la atmósfera terrestre (por ejemplo, debido a la quema de combustibles fósiles), también se disolverá cada vez más en el agua de mar, donde reacciona químicamente para formar ácido carbónico ($H_2O + CO_2 \rightleftharpoons H_2CO_3$). Esto tiene consecuencias fatales para la vida de las algas y los animales que viven allí, que no están adaptados al medio cada vez más ácido. Por ejemplo, las conchas de las algas calcáreas se vuelven más delgadas (véase la figura) y los corales pierden su esqueleto de carbonato de calcio. La fijación de CO₂ de los océanos está disminuyendo de forma generalizada.



Algas calcáreas: a la izquierda en el océano actual, a la derecha, un océano con alto contenido de CO₂. [Fuente: IFM-GEOMAR]

Materiales:

Dos vasos de precipitado de 50 ml
Indicador azul de bromotimol con tabla de valores de pH
Ácido cítrico, bicarbonato de sodio y agua
Matraz Erlenmeyer con tapón de goma y manguera



Montaje experimental

Ejecución:

- Coloca 50 ml de agua en un vaso de precipitados y añade 15 gotas del indicador hasta que la solución cambie de color significativamente.
- Anota el valor de pH de la solución.
- Vierte la mitad de la solución en el segundo vaso de precipitados.
- Mezcla una cucharadita de ácido cítrico y una de bicarbonato de sodio en el matraz Erlenmeyer. Luego agrega con cuidado un poco de agua y vierte con la manguera el CO₂ (dióxido de carbono) resultante hacia el agua en el segundo vaso de precipitados (observa la figura).
- Anota el valor de pH de la solución en el segundo vaso de precipitados.
- ¡Describe el resultado de la prueba en una oración!

No tires la solución del segundo vaso: ¡La necesitarás para la actividad 10!

Análisis:

Responde las siguientes preguntas con la ayuda del texto de antecedentes para el experimento 1 y con una búsqueda en internet bajo el Código QR que se muestra a la derecha:

¿En qué medida contribuyen los océanos a ralentizar el efecto invernadero provocado por el hombre?

¿Qué consecuencias tiene la acidificación de los océanos para sus criaturas?



Actividad 10 – Consecuencias del calentamiento de los océanos

¿Por qué el calentamiento de los océanos aumenta el calentamiento global?



Pascal Eitner, Markus Vogelpohl y Clemens Bröll

Antecedentes:

Los océanos tienen una doble función en la atenuación del calentamiento global: por un lado, almacenan calor y, por otro, absorben CO₂ de la atmósfera. Sin embargo, cuando la temperatura del agua aumenta, estos amortiguadores pierden su efecto: el agua caliente absorbe menos calor, ya que la diferencia de temperatura con el medio ambiente es menor, y también puede disolver menos CO₂. ¡Incluso lo vuelve a liberar a temperaturas más altas! La acidificación también conduce a la disolución de la cal, lo que libera más CO₂ a la atmósfera. El vapor de agua, el cual se produce en mayor cantidad como resultado del aumento de la temperatura del agua, es un gas de efecto invernadero mucho más potente que el CO₂ y, por lo tanto, provoca un aumento adicional del efecto invernadero.

Materiales:

- ✓ Aproximadamente 30 ml de solución ácida (segundo vaso de la Actividad 9)
- ✓ Dos vasos de precipitados de 50 ml
- ✓ Velas para té y cerillas
- ✓ Tabla de valores de pH



Montaje experimental

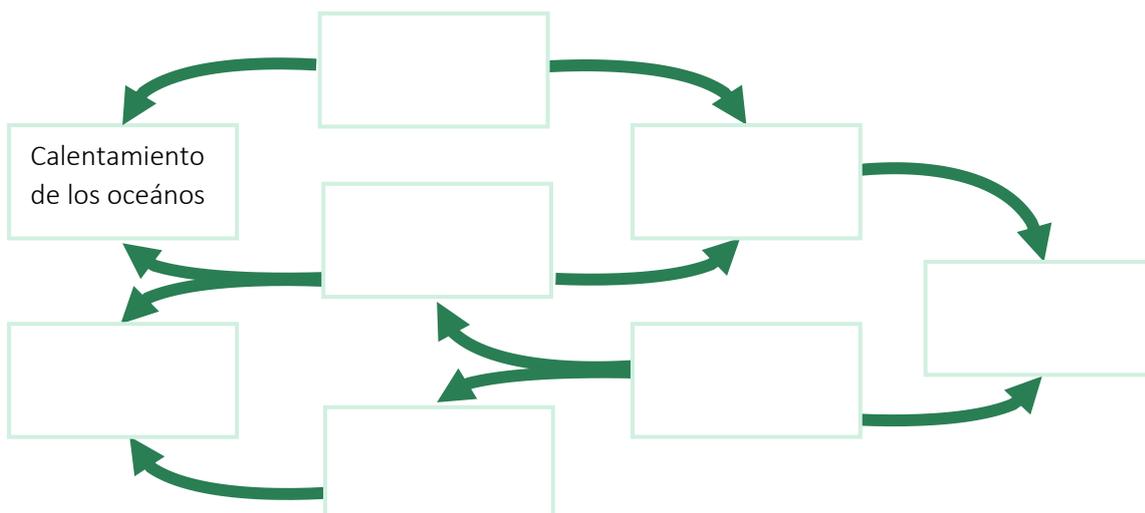
Ejecución:

- Distribuye la solución ácida uniformemente entre los dos vasos y reserva uno para compararlos más tarde.
- Calienta uno de los dos vasos con solución ácida sobre la vela de té durante tres o cuatro minutos. Luego coloca el vaso junto a la solución de comparación y espera unos minutos.
- Observa el cambio de color y anota el valor del pH de ambas soluciones.

Discusión:

Completa el siguiente diagrama de flujo con los módulos de texto que se indican a continuación:

Muerte de criaturas calcificadas; Reducción de capacidad de absorción de CO₂; Intensificación del efecto invernadero; Reducción del rendimiento de la fotosíntesis; Incremento de la concentración del CO₂ en la atmósfera; Emisión de CO₂; Acidificación de los océanos



Actividad 11 – Puntos de inflexión: cuando el clima cambia...

¿Será imparables en algún momento el cambio climático?

Antecedentes: Retroalimentación y puntos de inflexión

Al «inclinarte» con una silla, puedes ponerte en posición inclinada apoyándote contra una mesa. Si dejas de empujar contra la mesa, vuelves a la posición inicial.

¡Pero no empujes demasiado!

Desafortunadamente, el sistema climático de la Tierra se comporta de forma similar y podría inclinarse irreversiblemente en un futuro próximo si se emite una gigatonelada de gases de efecto invernadero de más.



Materiales:

- ✓ Perfiles basculantes de madera conectados
- ✓ Marco de madera o trípode
- ✓ Varilla de metal
- ✓ Pelota de tenis de mesa
- ✓ Peso deslizante de 50 g
- ✓ Bolsita
- ✓ 12 tuercas (M6)

Espaciadores
de madera

Tornillo con
tuerca

Peso deslizante

Montaje experimental para modelar los puntos de inflexión en el sistema climático de la Tierra



Preparación:

- Monta la estructura como se muestra en la ilustración. Deja la bolsa vacía de momento, dobla la abertura una vez y cuélgala en el gancho de madera fijado al tornillo entre los dos rieles. El peso corredizo (tuerca grande) se engancha de modo que la estructura (con la pelota de ping-pong y la bolsa vacía) quede horizontal.

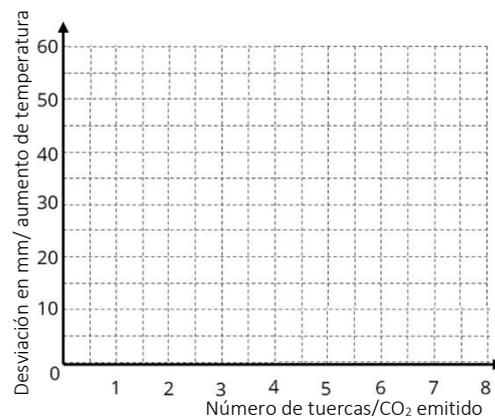
Analogía:

- La posición de la pelota simboliza el estado del clima terrestre y su estabilidad. En la posición inicial, el clima de la Tierra se encuentra en una posición relativamente estable.
 - El valor x de la derecha (mostrado en la parte exterior de la escala) corresponde al aumento de la temperatura media de la Tierra en comparación con la actual.
 - Cada tuerca colocada en la bolsa corresponde a la emisión de 40 Gt de CO₂, la emisión mundial debida a los combustibles fósiles en el plazo de un año.
- A continuación, emite gases de efecto invernadero colocando una tuerca en la bolsa y observa cómo aumenta un poco la temperatura en la Tierra (valor x).

Experimento 1: Pequeña causa, pequeño efecto

Vamos a examinar más de cerca la relación entre las tuercas insertadas y la posición x de la pelota:

- Coloca ocho tuercas una tras otra en la bolsa e ingresa la posición de reposo de la pelota en el diagrama. ¿A qué distancia se encuentra de la posición de reposo inicial al final?
Nota: Si crees que la bola está atascada, empújala suavemente y déjala reposar nuevamente.
- La pelota sigue a la izquierda. Ahora saca las tuercas de la bolsa una a una (se elimina CO_2 de la atmósfera) y marca las posiciones de reposo con un bolígrafo de otro color e introduce los valores en el mismo gráfico.



¿Cuál es la relación matemática en este experimento teniendo en cuenta los errores de medición?



Incendio forestal (Fuente: Pixabay.de)

Los incendios forestales devastadores de 2019/20 en Australia han liberado cerca de 30 Gt de CO_2 . Fueron el resultado de una sequía inusualmente larga. La destrucción de los bosques debido al aumento de las temperaturas es un ejemplo de punto de inflexión: El cambio climático trae consigo más plagas, incendios, tormentas y sequías. Como resultado, en particular los bosques nórdicos se están reduciendo. El CO_2 liberado acelera aún más el cambio climático.

Experimento 2: Pequeña causa, gran efecto

Ahora vamos a investigar el punto de inflexión en el que el sistema pasa a un estado diferente.

- Estima, sin realizar el experimento, a partir de qué posición la pelota rodará hacia el otro lado y cuántas tuercas corresponderían a esa posición, luego verifica tu estimado con el experimento.
- Coloca gradualmente algunas tuercas en la bolsita hasta que el sistema climático se desestabilice.
- Ahora extrae de la atmósfera terrestre el CO_2 añadido (retira las tuercas de la bolsita).
- Responde a las siguientes preguntas para el análisis:

¿Dónde se encuentra el punto de inflexión real en comparación con tu estimación?

¿El aumento drástico de temperatura disminuye cuando se extrae nuevamente el CO_2 de la atmósfera?

Los puntos de inflexión son cruciales para la dinámica catastrófica del cambio climático: Cuando se desencadena un punto de inflexión, no es perceptible inmediatamente, pero se pone en marcha un proceso que no es reversible! Un ejemplo: El hielo del océano Ártico refleja la luz solar. Si partes del hielo se derriten, más energía solar puede calentar el mar debido a la menor reflexión. Entonces, el hielo restante se derrite más rápidamente. Llega un momento en que el círculo vicioso ya no puede detenerse. Como en el juego del dominó, existe una cascada de puntos de inflexión en el sistema climático de la Tierra. Uno puede provocar el siguiente y el aumento de la temperatura se vuelve incalculable.

El Instituto de Potsdam para la Investigación del Impacto Climático (PIK por sus siglas en alemán) aborda científicamente estos puntos de inflexión. Busque en "elementos de inflexión del PIK" (código QR) para obtener más puntos de inflexión.

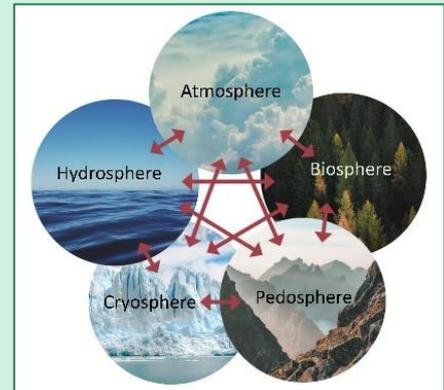


Actividad 12 – Puntos de inflexión: El Talón de Aquiles en el cambio climático

¿Qué son los puntos de inflexión y cómo están conectados?

Antecedentes:

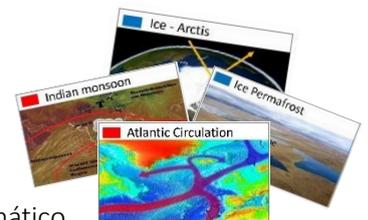
El sistema climático global de la Tierra está determinado por la interacción entre los principales componentes del sistema climático: hidrosfera (agua), atmósfera (aire), criosfera (hielo y nieve), pedosfera y litosfera (suelo y rocas) y biosfera (organismos vivos). El calentamiento global pone en marcha procesos que influyen y modifican estos elementos de diferentes maneras. Algunos de los procesos se retroalimentan: por ejemplo, el calentamiento global provoca un aumento de la evaporación del agua; y como el vapor de agua es un gas de efecto invernadero,



aumenta la temperatura de la atmósfera, lo que a su vez conduce a un aumento de la evaporación del agua. Debido a estos procesos de retroalimentación, cuando se supera un cierto umbral, el sistema climático de la Tierra puede entrar en un estado incontrolable de período cálido. Esto se conoce como punto de inflexión. "Inflexión" significa que estos cambios, a medida que se retroalimentan cada vez más, serán imparables o irreversibles. Los efectos ambientales de los puntos de inflexión son de largo alcance y podrían poner en peligro los medios de vida de muchos millones de personas.

Materiales:

- ✓ 14 tarjetas cada una: Ilustraciones (A) y explicaciones (B) de los puntos de inflexión



Ejecución:

En el mapamundi, los puntos de inflexión y las partes afectadas del sistema climático se muestran en diferentes colores:

Cuerpos de hielo  Sistemas de flujo  Ecosistemas 

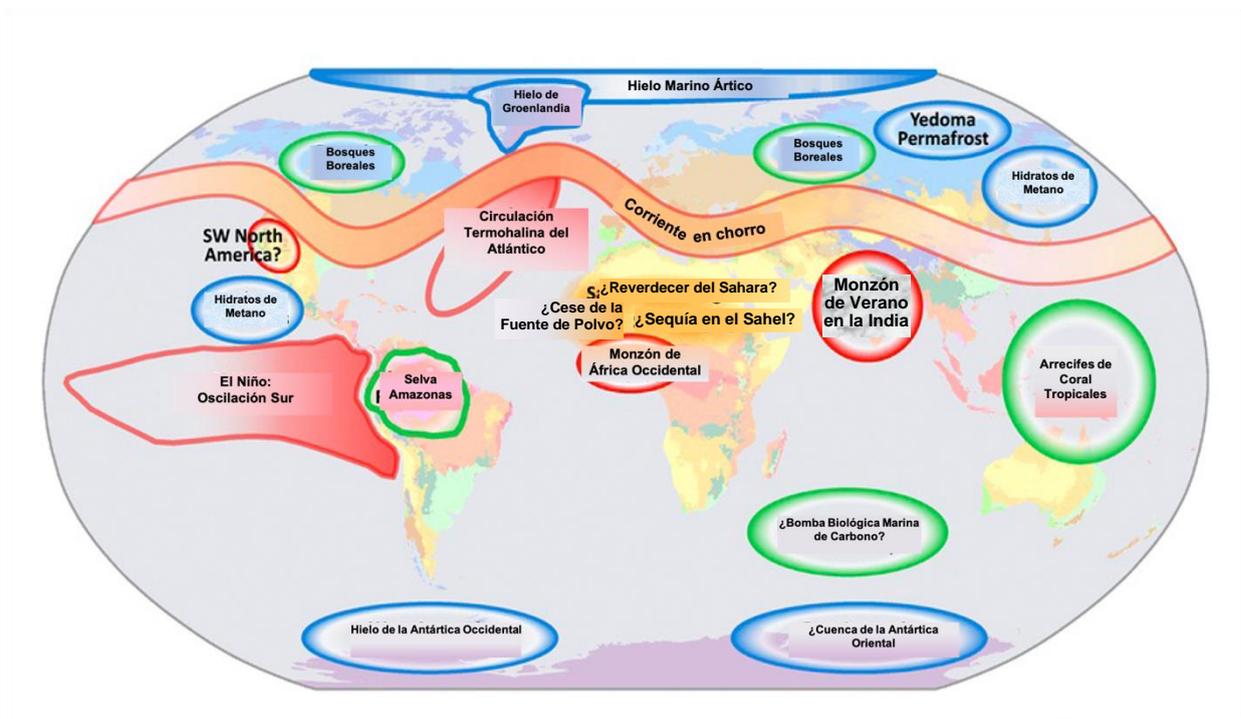
→ Coloca las 14 tarjetas con las ilustraciones de los puntos de inflexión (A) sobre la mesa y ordénalas por color. Coloca las tarjetas con las explicaciones y preguntas sobre los puntos de inflexión (B) en el lado derecho.



→ Asocia las tarjetas (B) con las correspondientes tarjetas (A) y forma los pares correspondientes. ¡Comienza con el mapa azul del Ártico (A)!

→ Mira nuevamente el mapa del mundo y responde las siguientes preguntas con la ayuda de los pares de cartas:

- a. ¿Cómo está cambiando la criosfera (hielo) debido al cambio climático? ■
- b. ¿Cómo cambian los sistemas de flujo debido al cambio climático? ■
- c. ¿Cómo están cambiando los ecosistemas como consecuencia del cambio climático? ■



Clasificación geográfica de puntos de inflexión importantes en el sistema Tierra
(Fuente: <https://www.pik-potsdam.de/services/infothek/kippelemente/kippelemente>)

- Componentes de la Criosfera
- Patrones de Circulación
- Componentes de la Biosfera

Clasificación geográfica de los elementos de inflexión en el sistema climático de la Tierra (Fuente: PIK 2007)

Bibliografía

- [1] R. M. Ramírez y L. Kaltenegger, "A Volcanic Hydrogen Habitable Zone", *The Astrophysical Journal Letters*, 1 de marzo de 2017.
- [2] G. Kopp y J. L. Lean, "A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance". *Geophysical Research Letters*, Vol. 38, No. 1, enero de 2011.
- [3] "Wiki Bildungsserver", Hamburger Bildungsserver, 3 de diciembre de 2013 [en línea]. Disponible: [https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Albedo_\(einfach\)](https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Albedo_(einfach)). [Consultado el 27/05/2020].
- [4] Trenberth, Fasullo y Kiehl (2009): Earth's global energy budget. En: Bulletin of the American Meteorological Society, basado en Kiehl y Trenberth 1997.
- [5] P. D. Jones, M. New, D. E. Parker, S. Martin, and I. G. Rigor, "Surface air temperature and its changes over the past 150 years," *Reviews in Geophysics*, vol. 37, no. 2, p. 173-199, 1999.
- [6] P. T. Doran y M. K. Zimmerman, "Examining the Scientific Consensus on Climate Change", *Eos*, vol. 90, nº 3, pp. 22-23, 2009.
- [7] S. Rahmstorf y H. J. Schellnhuber, *Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie*, Múnich: C.H. Beck, 2018.
- [8] "EU Science Hub", [en línea]. Disponible: <https://ec.europa.eu/jrc/en/news/global-fossil-co2-emissions-increased-2017>. [Consultado el 27 de mayo de 2020].
- [9] T. F. Stocker, D. Qin y otros, "Climate Change 2013", Cambridge University Press, Nueva York, 2013.
- [10] "Agencia Federal de Medio Ambiente" [en línea]. Disponible: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/lachgas-methan>. [Consultado el 21.09.2020].
- [11] "El índice anual de gases de efecto invernadero de la NOAA". NOAA, [en línea]. Disponible: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html>. [Consultado el 21.09.2020].
- [12] T. M. Lenton, J. Rockström, O. Gaffney, S. Rahmstorf, K. Richardson, W. Steffen y H. J. Schellnhuber, "Climate tipping points – too risky to bet against", *Nature*, vol. 575, pp. 592-596, 2019.
- [13] "Wiki Bildungsserver", Servidor de Educación de Hamburgo, 10 de septiembre de 2020 [en línea]. Disponible: https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Gr%C3%B6nlandischer_Eisschild. [Consultado el 21/09/2020].

- [14] "Scinexx", MMCD NEW MEDIA GmbH, 20 de diciembre de 2004 [en línea]. Disponible: <https://www.scinexx.de/news/geowissen/wird-der-amazonas-regenwald-zur-steppe/>. [Consultado el 21/09/2020]
- [15] "Wiki Bildungsserver", Hamburger Bildungsserver, 02 de diciembre de 2015 [en línea]. Disponible: https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Kippunkte_im_Klimasystem. [Consultado el 21/09/2020].
- [16] "Wiki Bildungsserver", Hamburger Bildungsserver, 5 de diciembre de 2013 [en línea]. Disponible: https://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Kohlenstoff_im_Ozean. [Consultado el 21/09/2020].
- [17] D. Coumou, S. Rahmstorf y otros, "A decade of weather extremes", *Nature*, 2012.
- [18] X. Chen, X. Zhang, J. Church, C. S. Watson, M. King, D. Monselesan, B. Legresy, y C. Harig, "The increasing rate of global mean sea-level rise during 1993-2014", *Nature Climate Change*, vol. 7, pp. 492-495, 2017.
- [19] P. Christoffersen y M. B. et. al, "Significant groundwater contribution to Antarctic ice streams hydrologic budget," *Geophysical Research Letters*, vol. 41, no. 6, pp. 2003-2010, 2014.
- [20] B. Schinke, S. Harmeling, R. Schwarz, S. Kreft, M. Treber y C. Bals, " Globaler Klimawandel: Ursachen, Folgen, Handlungsmöglichkeiten", Germanwatch, Bonn, 2011.
- [21] C. Jakobeit y C. Methmann, "Klimaflüchtlinge", Universidad de Hamburgo, Hamburgo, 2007.
- [22] J. A. Church, N. J. White, L. F. Konikow, C. M. Domingues, J. G. Cogley, E. Rignot, J. M. Gregory, M. R. v. d. Broeke, A. J. Monaghan e I. Velicogna, "Revisiting the Earth's sea-level and energy budgets from 1961 to", *Geophysical Research Letters*, vol. 38, n.º 18, pp. 1944-2007, 2011.
- [23] " Beobachteter Klimawandel", Agencia Federal de Medio Ambiente, [en línea]. Disponible: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/beobachteter-klimawandel>. [Consultado el 21/09/2020].
- [24] " Klimafolgen: Handlungsfeld Wasser, Hochwasser- und Küstenschutz", Agencia Federal de Medio Ambiente, 04.09.2013. [En línea]. Disponible: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimafolgen-deutschland/klimafolgen-handlungsfeld-wasser-hochwasser#wasserverfuegbarkeit-und-hitze>. [Consultado el 21/09/2020].
- [25] "Klima-Report Bayern 2015", Ministerio de Medio Ambiente y Protección del Consumidor del Estado de Baviera, Múnich, 2015.
- [26] B. f. Naturschutz. [En línea]. Disponible: <https://www.bfn.de/themen/biotop-und-landschaftsschutz/moorschutz/moore-entstehung-zustand-biodiversitaet/moortypen.html>. [Consultado el 20/10/2020].
- [27] D. G. f. M.-. u. T. e.V., "Was haben Moore mit dem Klima zu tun?", 2009.

- [28] H. Höper, "Freisetzung klimarelevanter Gase aus deutschen Mooren", *Telma*, vol. 37, pp. 58-116, 2007.
- [29] A. y M. D. Freibauer, "Moor unter: Climate protection" *Politische Ökologie*, vol. 30, pp. 98-105, 2012.
- [30] "klimawandel-meistern.bayern.de", Ministerio de Medio Ambiente y Protección del Consumidor de Baviera, [en línea]. Disponible: <https://www.klimawandel-meistern.bayern.de/moorschutz.html>. [Consultado el 20/10/2020].
- [31] M. & K. M. Drösler, "Klimaschutz durch Moorschutz – im Klimaprogramm Bayern (KLIP 2020/2050))", *Concern Nature*, vol. 42, nº 1, pp. 31-38, 2020.
- [32] W. Steffen, J. Rockström, K. Richardson, T. M. Lenton, C. Folke, D. Liverman, C. P. Summerhayes, A. D. Barnosky, S. E. Cornell, M. Crucifix, J. F. Donges, I. Fetzer, H. Schellnhuber y otros, "Trajectories of the Earth System in the Anthropocene", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 115, n.º 33, pp. 8252-8259, 2018.
- [33] H. D. Matthews et.al, An integrated approach to quantifying uncertainties in the remaining carbon budget, *Communications Earth & Environment*, 2, 2021, DOI: 10.1038/s43247-020-00064-9
- [34] Agencia Federal de Medio Ambiente, "<https://www.umweltbundesamt.de/>", [en línea]. Disponible: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/primaerenergieverbrauch> [consultado el 11/07/2021].
- [35] P. D. V. Quaschnig, Was kollabiert noch alles nach Corona?" [En línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=6V-C5q4VxEI>. [Consultado el 17/03/2021].
- [36] Agencia Federal de Medio Ambiente, "Umweltbundesamt.de", 12/11/2020 [en línea]. Disponible: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energieerzeugern-sektoren>. [Consultado el 17/03/2021].
- [37] Agencia Federal de Medio Ambiente, "www.probas.umweltbundesamt.de", [en línea].
- [38] "Energieszenarien," *Sonnenenergie*, nº de diciembre de 2020.
- [39] P. D. V. Quaschnig, "volker-quaschnig.de", [en línea]. Disponible: <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/ren-Strom-D/index.php>. [Consultado el 17/03/2021].
- [40] BMWI, "Energiedaten: Gesamtausgabe", 2019.
- [41] J. A. Robert Goodland, "Livestock and Climate Change", <http://templatelab.com/livestock-and-climate-change/>, 2009.

- [42] R. B. Fishman, "Schlechtes Gewissen, gutes Geld und faule Kompromisse", Deutschlandfunk Kultur, 24/11/2020 [en línea]. Disponible: https://www.deutschlandfunkkultur.de/co2-kompensation-schlechtes-gewissen-gutes-geld-und-faule.976.de.html?dram:article_id=488040 . [Consultado el 17/03/2021].
- [43] Agencia Federal de Medio Ambiente, "Umweltschädliche Subventionen in Deutschland 2016", 2016.
- [44] R. Goodland y J. Anhang, "Livestock and climate change", *World Watch*, vol. 22, pp. 10-19, noviembre de 2009.
- [45] J. Swim, P. Stern, T. Doherty, S. Clayton, J. Reser, E. Weber, R. Gifford y G. Howard, "Psychology's contributions to understanding and addressing global climate change", *American Psychologist*, vol. 66, nº 4, p. 241-250, 2011.
- [46] "Am 15. März ist CO2-Tag: Deutschland am Limit", Zukunft Erdgas e.V., 2020 [en línea]. Disponible: <https://zukunft.erdgas.info/ueber-zukunft-erdgas/experten-leistungen/kommunikation/kampagnen/co2-bud-get-deutschland>.
- [47] "„Treibhausgas-Emissionen in Deutschland", Agencia Federal de Medio Ambiente, 06 07 2020 [en línea]. Disponible: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland>. [Consultado el 22/09/2020].
- [48] Was haben Moore mit dem Klima zu tun?" Deutsche Gesellschaft für Moor- und Torfkunde e.V., 2009.
- [49] V. Quaschnig, "Sektorkopplung durch die Energiewende", Universidad de Ciencias Aplicadas de Berlín, 2016.
- [50] V. Quaschnig, "volker-quaschnig.de", [en línea]. Disponible: <https://www.volker-quaschnig.de/grafiken/index.php>. [Consultado el 12/10/2020].
- [51] Agencia Federal de Medio Ambiente, "CO2-Bepreisung in Deutschland", 2019.
- [52] C. y S. C. Buchal, Klima – Die Erde und ihre Atmosphäre im Wandel der Zeite, Fundación Wilhelm y Else Heraeus, Asociación Helmholtz de Centros de Investigación Alemanes, 2010.
- [53] G. Schröder, "Energiewende in Gefahr - Deutschland braucht mehr grünen Strom", Deutschlandfunk Kultur, [En línea]. Disponible: https://www.deutschlandfunkkultur.de/energiewende-in-gefahr-deutschland-braucht-mehr-gruenen.976.de.html?dram:article_id=481356. [Consultado el 17.03.2021].
- [54] ZDF, 28 de noviembre de 2019 [en línea]. Disponible: <https://www.zdf.de/nachrichten/heute/klickscham-wieviel-co2-e-mails-und-streaming-verusachen-100.html>.

Otras referencias bibliográficas

Bals, C. (2002): *Zukunftsfähige Gestaltung der Globalisierung. Am Beispiel einer Strategie für eine nachhaltige - Klimapolitik.*

En: In: Zur Lage der Welt 2002. Fischer Verlag.

Bals, C. et al. (2008): Die Welt am Scheideweg. Wie retten wir das Klima?
Rowohlt Verlag

Dincere, I. (2018): Comprehensive Energy Systems,
Elsevier Verlag.

Levke, C., Rahmstorf, S., Robinson, A., Feulner, G., Saba, V. (2018): Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation.

En: Nature [DOI: 10.1038/s41586-018-0006-5]

Church, J. und White, N. (2006): A 20th century acceleration in global sea-level rise.

en: Geophysical Research Letters, Vol. 33, L01602

Hupfer, P. (1998): Klima und Klimasystem.

en Lozan, J.L., H. Graßl und P. Hupfer: Warnsignal Klima. Wissenschaftliche Fakten, Hamburg, S. 17–24.

IPCC (2007a): Climate Change 2007 – The Physical Science Basis.

http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents

IPCC (2007b): Climate Change 2007 – Impacts, Adaptation and Vulnerability.

<http://www.ipcc-wg2.org/>

IPCC (2007d): Klimaänderungen 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger.

<http://www.proclim.ch/4dcgi/proclim/de/Media?555>.

IPCC (2007e): Climate Change 2007. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm.

Jonas, H. (1984): Prinzip Verantwortung, Suhrkamp Verlag.

Lenton, T.M. et al. (2008): Tipping Elements in the Earth's Climate System.

en: PNAS, Vol. 105.

Lesch, H. und Kamphausen, K. (2016): Die Menschheit schafft sich ab – Die Erde im Griff des Anthropozäns, Komplet-Media..

Rahmstorf, S. Rahmstorf, S. und Katherine Richardson, K. (2007): *Wie bedroht sind die Ozeane?* Fischer Taschenbuch Verlag.

Rahmstorf, S. und Schellnhuber, H.J. (2018): *Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie.* Verlag C.H. Beck.

Schüring, J. (2001): *Schneeball Erde.* Spektrumdirekt.

Seifert, W. (2004): *Klimaänderungen und (Winter-)Tourismus im Fichtelgebirge – Auswirkungen, Wahrnehmungen und Ansatzpunkte zukünftiger touristischer Entwicklung,* Universität Bayreuth.

Swim, J. K., Stern, P.C., Doherty, T. J., Clayton, S., Reser, J. P., Weber, E. U., Gifford, R., Howard, G. S. (2011): Psychology's contributions to understanding and addressing global climate change. *American Psychologist*, Vol 66(4), May–Jun 2011, 241–250.

WBGU (2007): *Welt im Wandel – Sicherheitsrisiko Klimawandel.* Hauptgutachten. Berlin. http://www.wbgu.de/wbgu_jg2007.html.

Literaturhinweise zu Abschnitt 6.4

Fritsche, I. & Masson, T. (2014). Adherence to climate change-related ingroup norms: Do dimensions of group identification matter? *European Journal of Social Psychology*, 44, 455–465

Bishop, B., Leviston, Z., & Price, J. (2014). Imagining climate change: The role of implicit associations and affective psychological distancing in climate change responses. *European Journal of Social Psychology*, 44, 441–454

Leach, C. (2008). Group-Level Self-Definition and Self-Investment: A Hierarchical (Multicomponent) Model of In-Group Identification. *Journal of Personality and Social Psychology*, 95(1), 144–65

Bertolotti, M. & Catellani, P. (2014). Effects of message framing in policy communication on climate change. *European Journal of Social Psychology*, 44, 474–486

Fielding K., Swim J. & Hornsey M. (2014). Developing a social psychology of climate change. *European Journal of Social Psychology*, 44, 413–420 (2014)

Publicación de la UNESCO Teaching and learning transformative engagement UNESCO, <https://en.unesco.org/themes/119915/publications/all>

