

Gaia: de Hipótesis a Teoría. Guía de la XVII Olimpiada de Ciencias de la Tierra para estudiantes de preparatoria de Baja California. Viernes 1 de junio de 2012. Auditorio de Ciencias de la Tierra. CICESE. Ensenada, Baja California.

La Teoría de Gaia es tal vez el mejor ejemplo reciente que ilustra cómo se hace la ciencia. En la pasada olimpiada exploramos la historia fascinante de cómo Aristarco de Samos midió el tamaño de la Luna y del Sol y sus distancias a la Tierra hace muchísimos años. Para esta olimpiada hemos preparado un tema también fascinante pero de actualidad. De hecho, de bastante actualidad porque está relacionado con el tantas veces mencionado en los medios como Cambio Climático Global, del que una de las consecuencias es el Calentamiento Global de la Tierra. El tema mismo del Cambio Climático Global lo tratamos en 2004. Lo que veremos ahora es la historia del descubrimiento de un mecanismo que tiene la Tierra para mantener una temperatura más o menos constante, a pesar de perturbaciones externas que tienden a cambiar su temperatura.

Homeostasis: ¿Una enfermedad?

Imagínense dentro de una casa en invierno, con temperaturas exteriores que fluctúan entre -10 grados centígrados en la noche y hasta 10 grados en el día. Esto es, con fluctuaciones de 20 grados en 24 horas. Y sin embargo, ustedes que han puesto el termostato de la calefacción a 25 grados, notarán, si es que lo notan, que en el interior de la casa los cambios son de tan sólo uno o dos grados. No es difícil imaginar cómo se las arregla la calefacción para mantener constante la temperatura de la casa sin la intervención de ustedes. Simplemente si la temperatura baja hasta determinado valor se enciende la calefacción y, cuando sube a ese valor se apaga. Lo mismo para el aire acondicionado o refrigeración, pero al revés y, así, ocurre con muchos aparatos que utilizamos diariamente, y que no necesariamente tienen qué ver con temperaturas. Tinacos, cisternas y tanques de sanitarios utilizan un flotador donde, si baja el agua a menos de cierto nivel, se abre una válvula para que entre agua y así volver al nivel requerido.

Los dispositivos descritos son muy simples y controlan procesos también muy simples. Procesos más complejos pueden requerir combinaciones de dispositivos y programas de computadora que tomen las decisiones de activarlos o desactivarlos. Hay automóviles que tienen lo que se llama

control de crucero, el cual, si se activa, hace que el auto viaje a la velocidad estipulada aunque haya subidas o bajadas. Si la velocidad disminuye el auto automáticamente acelera, y viceversa, de tal forma que la velocidad se mantiene alrededor del valor indicado. Las plantas que producen energía eléctrica como la que se encuentra en Rosarito, Baja California, también requieren de muchos de esos dispositivos para controlar la producción de energía eléctrica según la estemos necesitando los usuarios.

Todos los dispositivos mencionados son invenciones humanas. Algunos son muy simples y otros son tan complejos que necesitan computadoras para funcionar, pero todos tienen en común que están hechos de diferentes componentes y que esas partes funcionan en su conjunto para un fin determinado. El término que se utiliza para caracterizar al conjunto de las partes y su comportamiento es el de *sistema de control*. Y resulta que por más orgullosos que estemos de nuestros inventos, los sistemas de control no son nuevos pues los utilizan los seres vivos desde hace miles de millones de años, desde microorganismos unicelulares hasta los seres más complejos. En nuestro cuerpo están actuando en cada minuto muchos sistemas de control para mantener niveles constantes de azúcar, sales, líquidos y demás. No nos damos cuenta pero nuestro cuerpo es muy efectivo en mantener una temperatura constante, haga frío o calor. En casos extremos suda o envía sangre extra a la piel, dependiendo del caso. En general, trátase de temperaturas o de cualquier otra propiedad, el término que se utiliza para caracterizar esta tendencia automática al equilibrio es el de *homeostasis*, y no es una enfermedad sino todo lo contrario. El diccionario de la Real Academia Española lo define así: homeostasis. (De homeo-y el gr. stasis, posición, estabilidad). 1) f.Biol. Conjunto de fenómenos de autorregulación, que conducen al mantenimiento de la constancia en la composición y propiedades del medio interno de un organismo. 2. f. Autorregulación de la constancia de las propiedades de otros sistemas influidos por agentes exteriores.

La Hipótesis de Gaia

¿Y qué tiene que ver todo esto con la Tierra? Pues resulta que la temperatura de la Tierra se ha mantenido más o menos constante durante la mayor parte de su existencia, a pesar de que el Sol ha estado aumentando su luminosidad en la escala de millones de años. También se esperaría que la erosión continua de los continentes aumente la salinidad de los océanos, sin embargo, ésta no ha llegado hasta valores críticos que

impidan la existencia de vida en el mar, a pesar de que recibe de los ríos tanta sal que ya debería ser al menos diez veces más salado. También la composición de la atmósfera ha permanecido más o menos constante por muchos millones de años. En todos los casos se trata de condiciones que favorecen la existencia de vida en la Tierra. Por mucho tiempo se pensó que estas condiciones eran producto de la casualidad. Pero no para James Lovelock, científico inglés que por cierto todavía vive, a quien estas condiciones de estabilidad no le parecían debidas a la casualidad, y se propuso encontrarles una explicación. Para ello planteó la Hipótesis de Gaia, en la que propone que en la Tierra actúan sistemas de control homeostático y, que esos sistemas, los controlan los seres vivos. Esto es, que la Tierra se comporta como un ser vivo que controla su propia temperatura para beneficio de la vida, y que los responsables de dicho control son los propios seres vivos en su conjunto.

Un malentendido

Desafortunadamente para Lovelock, los biólogos no tardaron en descalificar la Hipótesis de Gaia, considerándola como pseudo-ciencia. En realidad todo se trató de un malentendido, lo que demuestra que aún entre científicos existen malentendidos. Los biólogos entendieron que Lovelock proponía que la Tierra era un ser vivo, cuando en realidad sólo decía que la Tierra se comportaba en muchos sentidos como un ser vivo, no que era un ser vivo. Mientras duró el malentendido uno de los argumentos de los biólogos era que las diferentes especies de seres vivos buscan su propia supervivencia, y que nunca colaboran en forma altruista para un fin común. Si acaso llegan a colaborar, como en los casos de simbiosis, necesitan estar tan cerca unas de otras que difícilmente afectan al ambiente. A lo más, como en el caso de los castores que pueden crear lagos artificiales, el alcance de sus efectos está limitado a pocos kilómetros. Pensar en colaboraciones que alcancen a toda la Tierra y por millones de años era simplemente impensable. Que la vida pudiese controlar la temperatura de la Tierra para su propio beneficio se antojaba, y todavía se antoja, como una especie de argumento místico ya superado hace siglos por la ciencia. Tampoco ayudó mucho que movimientos como *new age* (*nueva era*) acogieran la Hipótesis de Gaia con mucho entusiasmo, lo cual confundió a muchos científicos quienes se negaban a acreditar estas ideas como científicas.

Lovelock ahora agradece a sus críticos por haberlo estimulado a buscar un sistema de control homeostático que pudiese estar actuando al nivel de

toda la Tierra. Se propuso resolver el problema de que la temperatura de la Tierra no había aumentado de manera paralela a la luminosidad del Sol en la escala de cientos y miles de millones de años. ¿Si el Sol está cada vez más caliente, cómo es que la Tierra se las podría arreglar para mantener constante su temperatura? Lo que Lovelock hizo no fue descubrir cómo lo hace la Tierra, eso lo veremos más adelante, sino cómo podría hacerlo. Esto es, que diseñó un mecanismo para que la Tierra pudiera lograr ese fin. Sus talentos de inventor salieron a relucir. Y, como veremos más adelante, nadie creía que eso era posible. En ese entonces Lovelock ya era considerado como un gran inventor. Había inventado instrumentos para medir cantidades pequeñísimas de contaminantes como los clorofluorcarbonos (CFC), los principales compuestos industriales responsables del famoso Hoyo del Ozono. También se le atribuye la invención del horno de microondas, aunque no lo diseñó para preparar comida sino para revivir hámsteres congelados en experimentos criogénicos.

El Mundo de Margaritas

Busquen la palabra *Daisyworld* o Mundo de Margaritas. Así le llamó Lovelock al sistema de control homeostático que ideó para demostrar que su propuesta era una posibilidad real. Supuso que el Sol aumentaba su luminosidad con el tiempo y como consecuencia la Tierra estaría cada vez más caliente. Supuso además, que en la Tierra existían dos tipos de flores (*daisies* o margaritas), unas blancas y otras negras, así como suelo raso sin margaritas. Las blancas absorben menos luz que el suelo y el suelo menos que las negras. Por lo tanto, las negras tenderán a calentarse más que el suelo y el suelo más que las blancas. En cada caso el grado de calentamiento modifica los alrededores de las margaritas y del suelo. Se tiene además, que ambos tipos de margaritas se reproducen mejor a una temperatura media, y mueran a temperaturas menores de una mínima y mayores de una máxima. Esto es todo.

Veamos ahora qué pasaría si la Tierra sin margaritas tuviera una temperatura menor a la mínima. Obviamente ninguna margarita podría existir. Sin embargo, si ponemos una margarita negra ésta hará que su alrededor se caliente y, si la temperatura sube más allá de la mínima, entonces empezarán a reproducirse. Se reproducirán tanto negras como blancas, pero las negras tendrán ventaja porque el planeta está frío. ¿Pero qué pasará si hay demasiadas? Pues el planeta se calentará más allá de la temperatura máxima. Sin embargo, como también hay margaritas blancas,

éstas al reproducirse estarán afectando su entorno hacia un enfriamiento. Y si el Sol aumenta su luminosidad, pues entonces las favorecidas serán las blancas, porque ellas pueden bajar la temperatura. Y si la bajan demasiado, favorece a las negras que la pueden aumentar. Y si la aumentan demasiado, pues eso favorece a las blancas que la pueden bajar. Y si la bajan demasiado..... ¿Se entiende?

Simple, brillante y demoledor. Lovelock se sacudió las críticas de los biólogos utilizando los mismos argumentos manejados por ellos. Mostró cómo dos especies que actúan en su propio beneficio pueden terminar creando condiciones que las beneficien a ambas. La idea es importante pero más importante es que sea realista. Una manera de demostrarlo es hacer un modelo matemático con ecuaciones basadas en las leyes físicas y mostrar que los efectos anticipados son realmente posibles en un planeta como la Tierra. La investigación de Lovelock incluyó el desarrollo de las ecuaciones y su solución. De hecho, el trabajo se realizó como tesis de doctorado de uno de sus estudiantes. Ya existen en Internet programas interactivos que ustedes pueden utilizar y hasta jugar con las variables para experimentar con el modelo. <http://www.gingerbooth.com/flash/daisyball/DaisyBall.html> es la liga que utilizaremos. En esta liga hay dos opciones, DaisyWorld and DaisyBall. La última considera que la Tierra tiene una inclinación de 23.5 grados con respecto al plano de su órbita con respecto al Sol, y que la cantidad de luz por metro cuadrado que llega a la Tierra depende de la latitud. DaisyWorld y DaisyBall utilizan las mismas ecuaciones pero en este último se resuelven para diferentes latitudes. Por eso verán que unas margaritas se concentran en el ecuador y otras en los polos. Consulten las ecuaciones en *DaisyWorld-theMathy* piensen cómo las resolverían ustedes. ¿Cuál resuelven primero?

Siéntanse libres de cambiar las diferentes variables en la opción de *avanzado (advanced)*, para familiarizarse con el simulador. Empiecen con la opción por omisión (default), y revisen que la temperatura de la Tierra realmente se estabiliza cuando hay margaritas en comparación con la situación cuando no las hay. Cambien albedos, temperaturas máximas y mínimas, luminosidad, etc. Para volver a la opción por omisión utilicen *restore defaults*.

El examen tendrá algunas preguntas específicas sobre las gráficas de la opción por omisión, en su modalidad de DaisyBall . Por ejemplo ¿Cuál es la temperatura de la Tierra para el Sol actual, cuando hay margaritas

blancas y negras? Al inicio del calentamiento por las margaritas negras ¿Por qué prosperan las margaritas blancas? Y ¿Por qué las margaritas negras disminuyen cuando aparecen las blancas? Por otro lado, para luminosidades grandes, inmediatamente antes de que mueran todas las margaritas, la temperatura de la Tierra es muy inferior a la máxima de 40 grados que pueden soportar las margaritas. La pregunta sería: ¿Por qué entonces se mueren las margaritas en masa?

Una de las variables del simulador de Gaia es la cantidad mínima de suelo raso en donde no existen margaritas. La variable la llaman *deathrate* y por omisión tiene el valor de 0.3, significando que al menos 30% del terreno está sin margaritas. La *deathrate* puede variar desde 0 hasta 1.0 y según podrán observar la estabilización de la temperatura depende mucho del valor que utilicen. ¿Cuál es el mínimo terreno libre de margaritas para que la temperatura sea la adecuada para las margaritas? ¿Y cuál es el máximo terreno libre de margaritas para que la temperatura sea la adecuada para las margaritas? Utilicen como criterio de temperatura adecuada el que ésta no sea inferior a 21.5 ni mayor a 23.5 para luminosidad =1.0.

Otra de las opciones a las que se puede acceder en la opción de *avanzado* (*advanced*) es la de seleccionar un solo tipo de margaritas. La opción supone que sólo hay margaritas negras. La opción de sólo margaritas blancas se puede acceder optando por una sola especie y moviendo el albedo de las margaritas negras al lugar de las blancas. Vean qué pasa en cada caso y traten de explicarlo.

Teoría por Fin

Para que una hipótesis se convierta en teoría es necesario, primero, que haga predicciones sobre algo nuevo y, segundo, que esas predicciones se comprueben en la realidad. Hemos aprendido a través de milenios que ésta es la manera más segura de avanzar los conocimientos sobre la realidad. En nuestro caso, la Hipótesis de Gaia plantea que, de alguna manera todavía desconocida, en la Tierra operan mecanismos que regulan procesos globales en beneficio de los seres vivos y que los propios seres vivos son los que producen estos efectos. Lo que faltaría es encontrar uno de esos procesos en la naturaleza y la hipótesis se convierte en una teoría científica. Pero si ni siquiera se cree en la hipótesis nadie va a buscar esos procesos. Por eso es que Lovelock tuvo que desarrollar su Mundo de Margaritas, para convencer a los demás científicos, no para probar la

existencia de tales procesos en la naturaleza sino, por el momento, sólo mostrar que son posibles.

El Mundo de Margaritas es más un invento que un descubrimiento. De hecho, Lovelock lo considera su mayor invento. Le faltaba el descubrimiento en la Tierra de uno de esos procesos y, con los años lo encontró, pero no resultó ser exactamente el Mundo de las Margaritas porque uno de los actores resultó no ser un ser vivo. Veamos los detalles. El proceso es el de la regulación de la temperatura de la Tierra mediante el reflejo de la luz del Sol por las nubes. A mayor nubosidad menor temperatura y viceversa. Nada nuevo hasta aquí. Tampoco es nuevo que a mayor nubosidad menos luz que llega al mar, ni que a menos luz menos fotosíntesis y por lo tanto menos producción de algas. En corto, que las nubes afecten a las algas no es nada nuevo. Lo que sí es nuevo, sorprendente, increíble y hasta inverosímil, es que las algas afecten a las nubes. ¿Cómo podrían hacerlo? Pues resulta que si no hay algas no hay nubes en el mar, o hay muy pocas. Las algas producen como desecho un compuesto de azufre conocido como sulfuro de dimetilo, que en la atmósfera se descompone y produce pequeñísimas gotitas de ácido sulfúrico que son indispensables para la formación de las nubes en el mar. Con esto, las nubes afectan la producción de algas y a su vez las algas afectan la producción de nubes.

El ciclo del azufre

Al mismo tiempo que Lovelock buscaba su mecanismo de control, otros científicos buscaban de dónde obtenían las algas el azufre con el que hacen el sulfuro de dimetilo. Sabían que lo obtenían del mar, y que el mar lo recibía de los continentes mediante los ríos. Lo que no sabían era cómo regresaba el azufre del mar a los continentes. Y es que se trata de cientos de millones de toneladas. En los continentes hay pocas fuentes de azufre que, como los volcanes, provean de este elemento tanto a los continentes como al mar. El azufre lo necesitan los seres vivos porque forma parte de las proteínas y otros compuestos esenciales para la vida. Si ni en los continentes ni en el mar hay suficientes fuentes de azufre que aporten esas cantidades, la posibilidad que queda es que se esté reciclando entre los continentes y el mar. Pero permanecía el enigma de cómo regresa del mar a los continentes. La respuesta seguramente ya la están entreviendo ustedes con lo que han leído aquí sobre Gaia. De hecho, la búsqueda de la

solución al enigma del azufre fue estimulada por la otra búsqueda, la del mecanismo de control de la temperatura de la Tierra. Y bien: ¿Cómo regresa el azufre a los continentes? Para los que no lo han adivinado: en la lluvia. Lovelock considera como su mayor invento al Mundo de las Margaritas, y como su mayor descubrimiento al Ciclo del Azufre. No es lo mismo invento que descubrimiento.

La Ciencia del Sistema Terrestre

La Ciencia del Sistema Terrestre (EarthSystemScience) es una disciplina nueva inspirada por la Teoría de Gaia. Se basa en las disciplinas tradicionales pero el enfoque lo define el concepto de *sistema*. La Tierra como un sistema global donde interactúan la atmósfera, la hidrósfera, la litósfera y la biósfera. El énfasis es en descubrir y entender fenómenos o procesos en los que intervienen las cuatro esferas, y que nunca se entenderían trabajando aisladamente. El ciclo del azufre es un ejemplo. El metabolismo de las algas, la formación de nubes en los océanos y el acarreo de azufre por los ríos, aparentemente no se relacionan entre sí. En su descubrimiento fue muy importante pensar en forma gaiana –esto es, en forma global y considerando posibles mecanismos homeostáticos. Ésta es posiblemente la mayor contribución de la Hipótesis de Gaia a la cultura universal: una nueva forma de pensar sobre los procesos que suceden en la Tierra, más allá de como lo hacen las disciplinas tradicionales.

¿Es Gaia Todopoderosa?

Seguramente que ya se les habrá ocurrido que el mecanismo de homeostasis que descubrió Lovelock podría encargarse de evitar el Calentamiento Global. La opinión de Lovelock es que no. De hecho, como seguramente se enterarán, uno de sus últimos libros tiene el título apocalíptico de *La Venganza de Gaia*. Su posición es que debemos de dejar de quemar carbón, gas y petróleo en las plantas generadoras de energía eléctrica y que debemos reemplazarlas por plantas que no emitan dióxido de carbono. Sus predicciones eran muy pesimistas pero poco a poco las ha ido suavizando. Al parecer, lo que deseaba era asustarnos para de esa manera llamar la atención y que los gobiernos hagan algo al respecto. Sea lo que sea, encontrarán que hay todavía mucha controversia sobre los efectos del Cambio Climático Global. Por lo tanto, no se asusten.

Infórmense, comparen opiniones y analicen por ustedes mismos. Y a propósito: ¿Quién es Gaia?

Lovelock vs Molina

A pesar de todos sus éxitos como científico e inventor Lovelock no es infalible, como ningún científico lo es. El hecho de que su Hipótesis de Gaia resultara correcta en sus predicciones, no garantiza que sus opiniones sobre el Cambio Climático Global lo sean. Asimismo, si en algún momento anterior se equivocó sobre otras cuestiones, no significaba que sus ideas sobre Gaia estuvieran equivocadas. Cada cosa tiene que analizarse siguiendo un criterio de verdad y no por el prestigio o desprestigio de quien lo diga. Así es como se trabaja en la ciencia. Los científicos se critican y se revisan sus resultados unos a otros de tal forma que en corto tiempo se acaban las controversias. El mismo Lovelock fue protagonista de un incidente en el que estuvo completamente equivocado por varios años. Siendo el inventor del aparato para medir cantidades pequeñísimas de compuestos CFC, y además el descubridor de que estos se encontraban distribuidos por toda la Tierra (atmósfera), fue llamado por el congreso de los EEUU para atestiguar si estos eran potencialmente dañinos para la vida. El problema era que Mario Molina de la Universidad de California había demostrado en 1974, que los CFC pueden liberar cloro al descomponerse en las altas capas de la atmósfera y así destruir la capa del ozono. Lovelock atestiguó que los CFC eran extremadamente estables y que los resultados de Molina no eran concluyentes. A la vuelta de 20 años a Mario Molina le otorgaron el Premio Nobel de Química. En los últimos años Lovelock ha sido reconocido con muchos premios alrededor del mundo, aunque no con un Nobel, aunque tal vez lo merezca. ¿Ustedes qué piensan, lo merece? Y a propósito: ¿Quién es Mario Molina? Lean también sobre Thomas Midgley y sus inventos.

El Examen

Como siempre, se presentarán 100 preguntas. Sobre el tema de Gaia serán 20 preguntas. Sobre Aristarco de Samos (XVI olimpiada) serán 30, sobre Rayos y Centellas (XV) serán 25 y sobre Los Colores del Cielo (XIV) serán 25. Las preguntas nuevas serán sobre el presente tema de Gaia, así como en la XVI fueron nuevas las de sobre Aristarco de Samos, en la XV las de sobre Rayos y Centellas y en la XIV sobre los Colores del Cielo. Estas 80 preguntas las pueden consultar en los informes correspondientes a las olimpiadas mencionadas, los cuales están disponibles en esta misma

página (www.ugm.org.mx). Para los que nunca han asistido a una de nuestras olimpiadas se les recomienda ver en YouTube: <http://www.youtube.com/watch?v=Q5d-4HvP32U>.

Inscripciones

Por favor recuerden que es muy conveniente para nosotros que se inscriban con anterioridad, ya sea en forma individual o en grupo, electrónicamente según se indica en esta página, porque nos permite planear mejor la cantidad de exámenes que debemos imprimir, preparar un día antes los gafetes con sus nombres, imprimir los diplomas de participación, así como el número de mesa bancos que necesitaremos y la cantidad de alimento que debemos ordenar. Sin embargo, aún si no se inscriben con anticipación, pueden llegar ese mismo día e inscribirse. Hasta la fecha hemos podido manejar a los pocos que a última hora se deciden en participar.

Habrá pan, café, chocolate y frutas para quienes no hayan desayunado. De 8:00 a 10:00 se entregarán los gafetes con sus nombres. A las 10:00 inicia el examen y se suspenderá a las 12:01. Antes de la comida tendremos, como siempre, la visita a varios laboratorios de Geología y Geofísica Aplicada, incluyendo la red sismológica donde se reciben las señales de los sismos que ocurren en Baja California. Entre las 14:00 y 15:00 PM se harán las premiaciones.

Les envío un saludo cordial y buena suerte. Los esperamos en Ensenada.

Atentamente,

Dr. Enrique Gómez Treviño.

Coordinador de las Olimpiadas