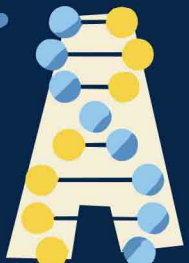


del
**SISTEMA
SOLAR**

Contar
historias
para enseñar

al

las teorías
científicas en
la escuela



ADN



Gabriel
Gellon



2. EL SISTEMA SOLAR PITAGÓRICO

En esta primera viñeta histórica estudiaremos, de manera muy simplificada, cómo los pensadores de la Antigüedad –particularmente los griegos– llegaron a concebir una visión bastante compleja del sistema solar, según la cual un puñado de astros gira alrededor de una Tierra inmóvil. Puede parecer extraño que empecemos nuestro recorrido por una idea, una teoría, que más tarde fue desechada (a favor de la versión de Copérnico con el Sol en el centro del sistema solar). Podríamos pensar que si el modelo antiguo, geocéntrico, fue descartado es porque estaba mal, y que si estaba mal es porque no era científico. Veremos más adelante cómo y por qué la idea antigua fue reemplazada por nuestra concepción actual y analizaremos entonces qué hacen los científicos cuando tienen que optar entre dos modelos que compiten o cuando una teoría parece no ser adecuada y debe ser cambiada drásticamente. Por el momento, revisemos qué tenían entre manos los antiguos y por qué lo que propusieron, lejos de ser ridículo, era una de las ideas más razonables que se pudiera concebir. Una idea no es más o menos científica porque se la descarte más tarde.



MIRAR EL CIELO E IMAGINAR EL COSMOS

Los griegos de la Antigüedad no tenían distracciones nocturnas como las que tenemos en la actualidad; sin televisión, luz eléctrica o papel impreso, por las noches se dedicaban a las bacanales y a mirar el cielo estrellado. Eran muy observadores y vieron cosas que ahora nos pasan desapercibidas a pesar de estar fácilmente a nuestro alcance.

Lo primero que observaron es que los astros del cielo nocturno se mueven del mismo modo que el Sol durante el día: salen por el este y se ponen por el oeste. La Luna y todas las estrellas hacen lo mismo, se mueven aproximadamente a la misma velocidad que el Sol y dan una vuelta entera en 24 horas. Esto es cierto para todas las estrellas, menos una, Polaris, que nunca se mueve. Es más, las estrellas que se encuentran muy cerca de Polaris hacen giros muy pequeños alrededor de esta estrella quieta. De hecho, todo el cielo parece girar como si fuera una esfera hueca con un clavito pinchado justo en ese punto, al que se llama “polo norte celeste”. Por eso hablamos de la “bóveda celeste”. De este modo, si miramos el cielo toda la noche y mentalmente aceleramos ese movimiento, nos da la impresión de que estamos quietos y el cielo rota sobre nuestras cabezas de este a oeste como un gran telón circular. Los griegos especulaban con que la bóveda era opaca y oscura, pero que tenía infinidad de agujeritos que dejaban pasar la luz celestial que había del otro lado.

La Luna, sin embargo, tenía particularidades que la distinguían. Si uno la mira un día cualquiera, se mueve de este a oeste como todo bicho en el cielo, y de hecho tiene un recorrido muy parecido al del Sol. Pero si uno espera un par de días verá que la Luna se desplaza a una velocidad distinta del resto de los astros: sale y se pone todos los días una hora más tarde que el Sol o las estrellas. O sea que se mueve de manera más lenta que el Sol. La pregunta es cómo hace para no chocarse con el Sol y las estrellas con las que comparte el recorrido en

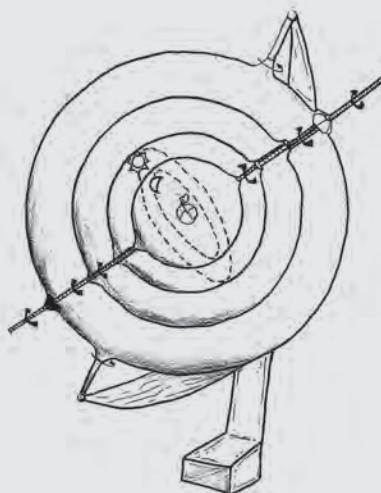
el cielo. Es evidente que la Luna tiene que moverse en una esfera diferente a la del Sol y las estrellas, que la bóveda tiene por lo menos dos capas, una para la Luna y otra para el resto. Por otro lado, los eclipses nos muestran que la Luna está más cerca de la Tierra que el Sol y, seguramente, que las estrellas.

Pero la cosa no termina ahí. Si uno mira las estrellas con detenimiento, notará que salen y se ponen algo más *temprano* cada día (no mucho, unos cuatro minutos, pero después de un mes sí se nota). Es decir que el Sol se mueve un poco más despacio que las estrellas. Después de un año entero, las estrellas han dejado al Sol tan atrás que logran alcanzarlo de nuevo como cuando corremos carreras en círculos y volvemos a pasar al más lento. Al cabo de un año, las estrellas vuelven a salir a la misma hora que el año anterior y se repite un ciclo. Pero eso quiere decir que existen tres capas para la bóveda, que se mueven a velocidades distintas: la capa de las estrellas, la del Sol y la de la Luna. Y esas capas tienen que ser transparentes, porque si no fuera así, no veríamos las capas que están por detrás. Los griegos las llamaron “esferas celestes”, y se especulaba que estaban hechas de un material “celestial”, especial, eterno e incorruptible (el llamado “quinto elemento”).

Todo esto parecía sencillo, hasta que algunos pensadores notaron, aguzando el nivel de precisión de sus observaciones, que hay unas pocas estrellas que rompen filas con sus constelaciones y cambian de posición respecto del fondo estrellado. Se mueven por su cuenta, a su propia velocidad. Son muy pocas y por eso el cielo nocturno no nos parece un caos sino que tiene siempre las mismas constelaciones. Llamaron a estos astros “estrellas vagabundas”. “Vagabundo”, en griego, se dice *planeta*. Todas estas estrellas vagabundas o planetas salen por el este y se ponen por el oeste, como el Sol, la Luna y las estrellas; todas salen cada día un poquito más temprano, pero cada una tiene su propia velocidad. De esto dedujeron los pensadores que debían estar alojadas en sus propias esferas celestes, una para

cada una. Los planetas eran Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Con la Luna, el Sol y las estrellas de fondo, tenemos siete esferas y la bóveda final. Hacia el año 500 a.C. la escuela de Pitágoras había ideado una hermosa manera de imaginarse la estructura del cosmos. La Tierra, una roca en forma de pelota, está en el centro de un conjunto de esferas huecas y transparentes. La esfera más exterior contiene a las estrellas fijas y gira de este a oeste alrededor de la Tierra dando una vuelta cada veinticuatro horas. Las esferas más internas están enganchadas a esta esfera exterior y por lo tanto también ejecutan ese giro de este a oeste cada día. Pero además, cada esfera interna tiene un giro propio respecto de la esfera exterior en sentido inverso (es decir, de oeste a este). Por eso se mueven ligeramente más lento respecto de las estrellas. Cada esfera sucesiva tiene un nuevo movimiento inverso de oeste a este, de modo que cuanto más nos acercamos a la Tierra, más lento es el movimiento del astro en relación con las estrellas. La Luna tiene el movimiento invertido más rápido, o sea, es la que se mueve más lentamente respecto de las estrellas. Es, incluso, más lenta que el Sol, como ya vimos.

Figura 2. Una forma de imaginar las esferas celestes



Este esquema era muy hermoso. Un mecanismo simple, con reglas sencillas, daba sentido a todo lo que se veía en el cielo. Pero tenía dos grandes problemas.

- ✓ No permitía hacer cálculos: no se lo podía usar para saber cuándo iban a estar los astros en determinadas posiciones (cuestión nada menor para la astrología, que intentaba relacionar los eventos de la humanidad con las posiciones de los astros).
- ✓ No podía explicar adecuadamente ciertos aspectos extraños del movimiento de los planetas (que veremos más adelante).

No todo es perfecto; como se dice con frecuencia, “es lo que hay”.

Comentarios y ejercicios

Las observaciones del cielo mostraron a los antiguos que hay fenómenos que suceden con llamativa regularidad y les sugerían, por lo tanto, que eran la manifestación de un *mecanismo*, posiblemente como una gran maquinaria. La gran pregunta era cómo estarían organizados los cielos, cómo era la “maquinaria celestial” que producía en el cielo nocturno los movimientos que estamos acostumbrados a ver. ¿Por qué hay astros que se mueven a diferentes velocidades y por qué se cumplen ciertos ciclos? El desafío era encontrar un modelo sencillo que acomodara con elegancia todas las observaciones que ellos hacían desde la superficie de la Tierra. Los pensadores antiguos produjeron muchos de estos modelos. El que se presenta en la viñeta fue invención de la escuela pitagórica, aunque no se sabe qué rol cumplió el propio Pitágoras, dado que su escuela perduró casi doscientos años. Se piensa que el pitagórico fue el primer modelo en considerar una Tierra esférica, pues los anteriores la imaginaban como un disco plano.

La cosmovisión de los pitagóricos busca acomodar con belleza una serie de observaciones complejas. Para eso, precisamente, sirve una teoría científica. Decimos que las teorías son esquemas de

pensamiento que le dan un sitio lógico a una serie de observaciones que de otro modo parecen inconexas o caprichosas. Por otro lado, lo que vemos en este ejemplo es que la teoría invoca o inventa una serie de nociones u objetos que no son observables (como las esferas transparentes, que no son perceptibles), pero que aparecen para darles sentido a las observaciones. Es decir que en una teoría podemos distinguir por lo general ciertas cosas que son observables de manera directa (el movimiento del Sol en el cielo) y otras imaginadas (el Sol gira en un círculo alrededor de una Tierra esférica).

A continuación, ofrecemos, para trabajar con los alumnos, algunas consignas que buscan poner de relieve la relación entre las teorías (como ideas “inventadas” o imaginadas para dar sentido a una serie de datos) y las observaciones o los datos que dichas teorías buscan explicar.



PROPUESTAS PARA EL AULA

1. En la siguiente lista marquen con una O si se trata de observaciones y con una T si son nociones teóricas inventadas para acomodar las observaciones.

		O/T
A	El Sol sale por el este y se pone por el oeste.	O
B	La Tierra es una esfera y el Sol gira alrededor de ella.	T
C	Las estrellas no cambian posiciones unas respecto de otras en el cielo.	
D	Polaris es una estrella que no se mueve.	
E	Todas las estrellas giran en torno a Polaris de este a oeste.	
F	La Luna sale y se pone una hora más temprano cada día.	
G	El Sol y la Luna se mueven en esferas celestes diferentes.	
H	Los planetas son estrellas que no respetan las constelaciones y se mueven en el cielo con velocidades propias.	
I	Cada planeta tiene su propia bóveda a una distancia diferente de la Tierra.	
J	Las esferas celestes son transparentes y de un material incorruptible que no se encuentra en la Tierra.	

2. ¿Por qué los pitagóricos postulaban que las esferas celestes son transparentes?
3. ¿Qué tipo de observaciones llevaron a los antiguos griegos a postular que el Sol y la Luna están a diferentes distancias de la Tierra?

4. ¿Por qué cada planeta debe estar en una esfera propia diferente de la que tienen las estrellas, la Luna o el Sol?
5. Pregunta desafiante. El Sol y las estrellas se vuelven a alinear en la misma posición relativa después de transcurrido un año: ¿qué otra cosa vuelve a ser igual después de un año? En otras palabras, si se perdieran en una isla desierta, ¿cómo podrían darse cuenta de si ha pasado un año o no?
6. Pregunta desafiante. Si el tema les resulta interesante, busquen cuánto tarda un planeta determinado (o cada planeta) en volver a estar en la misma posición respecto de las estrellas y comparen ese tiempo con lo que tarda el planeta Tierra.
7. Si tuvieran que explicarle a una persona que no conoce el tema qué es y para qué sirve una teoría científica, ¿qué le dirían?

Hay dos preguntas “desafiantes”: proponen un recorrido propio. La 5 busca que los alumnos relacionen lo que pasa con las estrellas en un año, con otra definición de año (más cercana a nuestras vidas): en las latitudes templadas las estaciones y el largo de los días varían en un ciclo que dura también 365 días. La consigna 6 da pie a investigar lo que se denomina “año” de cada uno de los planetas. Considerando la observación del cielo, el año de un planeta es el tiempo que tarda en volver a una situación respecto de las estrellas. Ahora sabemos que este es el tiempo que demora el planeta en girar alrededor del Sol, pero eso naturalmente no se sabía en la época de los pensadores pitagóricos.

Bibliografía

Levinas, M. L. (2012), *Las imágenes del universo. Una historia de las ideas del cosmos*, Buenos Aires, Siglo XXI.

Rogers, E. M. (2011), *Physics for the Inquiring Mind. The Methods, Nature, and Philosophy of Physical Science*, Princeton, Princeton University Press.



3. LA ERA DEL HIELO

La observación del cielo inspiró en los antiguos griegos una visión del cosmos. Podían ver el sistema solar “desde afuera”, por así decirlo, con el ojo de sus mentes. Habían forjado una “teoría del cosmos”, una idea que explicaba lo que veían. Hay teorías menos grandiosas, que se aplican a lugares o situaciones más acotados. En el siglo XIX, los geólogos se preguntaron cuál era el origen de los valles alpinos. En esa época existían explicaciones del origen de los valles, pero no resultaban convincentes para todos. Resolver este problema acotado –el origen de los valles alpinos– condujo a una idea en ese entonces curiosa respecto del pasado de la Tierra, que resultó una de las cosmovisiones más prósperas respecto de la historia de nuestro planeta.



BAJO UN MANTO DE HIELO

Muchos grandes cordones montañosos como los Alpes tienen entre las cumbres valles profundos, que dan la impresión de haberse formado por acción de la erosión. Por lo general los valles alpinos tienen ríos que corren en su fondo, y no es descabellado pensar que esos mismos ríos hayan cavado, a lo largo de muchísimos miles de años, los actuales valles. Los geólogos del siglo XIX eran partidarios de esta idea. Era muy fuerte en ese entonces la creencia de que grandes cambios en el paisaje podían deberse a la acción persistente de pequeñas, diminutas acciones a lo largo de muchísimo tiempo. Otra forma de explicar el origen de los valles era imaginar que una o unas pocas inundaciones descomunales habían provocado flujos gigantescos de agua que habían arrollado parte del paisaje.

Sin embargo, muchos aspectos del paisaje no encajaban con ninguna de estas dos hipótesis. Lo más curioso eran las rocas solitarias, que muchas veces eran más grandes que un camión o una casa. A menudo estas rocas, llamadas “erráticas” descansaban en lo alto de un monte o en el fondo de un valle y nadie tenía la menor idea de cómo se habían desplazado hasta allí. Ni una inundación ni un río podían mover semejantes moles y mucho menos desplazarlas hacia arriba, porque –como todos sabemos desde jardín de infantes– las rocas no flotan. El mineral del que estaban hechas era muy similar a minerales localizados muchos kilómetros más lejos. Por ejemplo, en Alemania hay rocas erráticas de pedazos de mineral de Escandinavia o rocas de granito en valles alpinos que parecen provenir de las alturas del Mont Blanc. ¿Cómo se desplazaron hasta su presente ubicación? Sin duda, no por la acción del agua...

Figura 3. Roca errática



Otros misterios estaban relacionados con las paredes de los valles, que tienen estriaciones y marcas que corren paralelas al eje principal del valle. Estas estriaciones parecen ser producto de una erosión brutal. Pero era difícil pensar que el agua las hubiera causado. En efecto, sabemos que el agua, con el tiempo, tiende a alisar las superficies y hacerlas más pulidas y suaves, no estriadas. Al pie de las montañas, en la boca de los valles –por decirlo así–, se encuentran pequeñas elevaciones de un material que, a diferencia del terreno circundante, no tiene estratos de roca unos arriba de otros. Parecen más bien pilas de escombros gigantes, compuestas de barro y rocas de todos los tamaños.

Todas estas características (y otras más complicadas) eran desconcertantes para los geólogos de la época. A mediados de 1800, varios observadores sagaces propusieron una solución. El más destacado de ellos fue el paleontólogo suizo Louis Agassiz. Primero pensó que el único agente capaz de transportar las rocas erráticas era el hielo (especialmente hacia arriba, dado que las erráticas pueden “flotar” sobre el hielo). Luego advirtió que los glaciares alpinos dejaban marcas en las paredes rocosas similares a las estriaciones de los valles. Y por último observó que allí donde terminaban los glaciares había pilas

de escombros sin estratificaciones llamadas “morenas” y que todos coincidían en que eran resultado de la escoria empujada por el movimiento del hielo. Sobre esta base, Agassiz propuso que los valles alpinos se habían formado por la acción erosiva de gigantescos ríos de hielo, megaglaciares que en el pasado se habían extendido mucho más al sur de las posiciones de sus actuales y minúsculas versiones. Pero las erráticas, las pilas enormes de escombros y las estriaciones eran observables en lugares muy alejados de cualquier glaciar, como en Escocia e Irlanda. Esto quería decir que, en algún pasado, glaciares gigantescos habían cubierto gran parte de la Tierra y, por lo tanto, que en ese pasado la Tierra debía haber estado mucho, mucho más fría que ahora.

Figura 4. Mesa glaciar: un ejemplo de una roca errática “flotando” sobre el hielo



Agassiz hizo públicas sus ideas en 1837 en una reunión científica. La reacción fue intensa: abucheos, gritos y una controversia que se prolongó por años. La idea de una “Era del Hielo” era difícil de digerir: en esa época se aceptaba que la Tierra se había formado a temperaturas muy altas y que desde entonces se enfriaba lenta pero inexorablemente. La idea de Agassiz implicaba que el

presente era más caliente que el pasado (el Pleistoceno), lo cual no era compatible con un enfriamiento constante. La Era del Hielo tuvo, por lo tanto, una recepción pobre (¿podríamos decir “fría”?).

Sin embargo, otras piezas empezaron de a poco a encajar bien con la idea de una época glacial. El paleontólogo Edward Forbes estudió fósiles de moluscos en el fondo del mar, cerca de Inglaterra y encontró que en cierto período los fósiles correspondían a especies más parecidas a las variedades del Ártico, lo cual era un indicio de una época pasada más fría.

Además, los geólogos sabían desde hacía tiempo (por observar la distribución de fósiles marinos) que la altura del mar había ido variando con el tiempo. La idea de la era glacial ofrecía una explicación: en las épocas de frío una proporción más grande del agua global se encuentra atrapada en hielos continentales (glaciares) y el nivel del mar, por lo tanto, desciende. Es justamente lo contrario de lo que sucede en la actualidad con el calentamiento global, que ocasiona una subida del nivel del mar. Curiosamente, los períodos de bajo nivel del mar coinciden con fósiles árticos en zonas que ahora son templadas.

Con el tiempo, los científicos fueron aceptando esta idea e incluso se hizo obvio que ha habido otras muchas eras del hielo, algunas más intensamente frías que las del Pleistoceno. La hipótesis de una Tierra en constante enfriamiento fue abandonada. Muchas otras líneas de evidencia apoyan la idea de que hubo no una, sino varias eras del hielo en el pasado remoto de la Tierra. Por ejemplo, actualmente es posible analizar qué tipo de átomos existen en burbujas de aire atrapadas en los hielos de la Antártida hace muchísimo tiempo. Y el tipo de átomos en el aire puede variar con la temperatura, de modo que este análisis nos permite inferir la temperatura del pasado. Y lo que se observa es que, en efecto, la composición del aire atrapado en el pasado es consistente con una Era del Hielo.

Comentario y ejercicios

Espero que sean evidentes las similitudes entre el sistema solar de los antiguos y la Era del Hielo de Agassiz. En ambos casos hay una serie de observaciones básicas que plantean un enigma o problema. En el primero, las observaciones son todos los movimientos de los astros en el cielo y el problema es concebir un mecanismo cósmico que produzca este tipo de efecto mirado desde nuestro punto de vista en la Tierra. En el segundo, las observaciones son características físicas del paisaje de los valles alpinos y el enigma es cómo pueden explicarse esas características y al mismo tiempo proponer un mecanismo que haya dado origen a los valles por erosión. En ambos casos se presentan entidades o situaciones que son invisibles: las esferas celestes que llevan a los astros en movimientos de giros y los megaglaciares que cubrían la mitad de la Tierra en el pasado. No podemos ver las esferas porque son muy grandes y nosotros estamos metidos adentro del sistema solar: es imposible mirar el sistema solar “desde afuera”. Los megaglaciares son cosa del pasado y sin una máquina del tiempo es imposible observarlos directamente. Se plantea la existencia de estas entidades imaginadas para poder resolver el enigma. El razonamiento es que “deberían existir o haber existido” si pretendemos que el universo tenga sentido. No podemos verlas, pero *inferimos* su existencia, las proponemos para darle sentido a la realidad.

En el caso de la Era del Hielo encontramos una nueva característica de los cuerpos teóricos. Notemos que Agassiz y sus contemporáneos propusieron la idea de la Era del Hielo en principio para resolver tres misterios que planteaba el paisaje: las rocas erráticas, las estriaciones de las paredes de los valles y las morenas (había otros, pero simplifiquemos). Agassiz propuso, entonces, que los “ríos de hielo” podían sostener y transportar grandes rocas; podían, al ser sólidos, raspar y tallar las paredes de los valles, y producir así estriaciones y morenas. Pero eso no bastó para consolidar la teoría de las glaciaciones. Lo que ocurrió fue que *después* de que Agassiz hubiera propuesto la idea, *otros investigadores* encontraron que esa idea les permitía explicar *otros* fenómenos. Por ejemplo: los fósiles de moluscos típicos del Ártico en las costas de Inglaterra y el cambio en los niveles del mar en diferentes épocas del pasado geológico. Permítanme remarcarlo una vez más: Agassiz no pensó su teoría

para esclarecer el cambio en los niveles del mar, lo hizo para explicar el origen de los valles alpinos. Pero de pronto, y para sorpresa de todos, vemos que la teoría explica, o *acomoda*, nuevas observaciones para las que no fue construida. Cuando una teoría logra hacer esto, gana enorme verosimilitud. Cuanto más encaje con la teoría, más robusta es la teoría. Pero si las cosas que encajan no son justo esas para las cuales la teoría fue armada en primera instancia sino otras *nuevas*, termina siendo mucho más atractiva para los científicos. Si no hay que emparchar y modificar las teorías viejas o inventar otras cada vez que aparecen datos nuevos, entonces quiere decir que esas teorías deben ser realmente buenas.

Por último, vemos en este caso también que la aceptación de una teoría no es un proceso rápido ni necesariamente amigable. Agassiz padeció un enorme rechazo a sus ideas. Enfrentados a la evidencia, geólogos de talla como William Buckland, Roderick Murchison y Charles Lyell dudaban y buscaban otras formas de acomodar lo que veían. Esto no es necesariamente malo. Es importante que los científicos no se casen con una nueva idea, sino que traten de conservar las viejas por todos los medios. Si someten las ideas nuevas a su encarnizado escepticismo, sin lugar a dudas encontrarán errores, y si sobreviven a ese escrutinio, es más probable que sean ciertas.

A continuación, una serie de consignas para resolver con los alumnos. Retoman lo trabajado en la viñeta anterior respecto de la relación entre las teorías (como ideas “inventadas” o imaginadas para dar sentido a una serie de datos) y las observaciones o los datos que dichas teorías buscan explicar.



PROPUESTAS PARA EL AULA

1. ¿Cuáles de las siguientes expresiones se refieren a fenómenos o entidades observables y cuáles a fenómenos o entidades propuestas de manera teórica? Marquen con una cruz en O si es Observable y en T si es teórica.

	Fenómeno o entidad	O	T
A	Los valles alpinos fueron tallados por la erosión de glaciares prehistóricos.		
B	Los glaciares dejan estriaciones en las rocas adyacentes.		
C	Los glaciares se mueven muy lentamente.		
D	Existen grandes rocas que no se asemejan por su composición al material geológico de la región donde se encuentran.		
E	En otras épocas la Tierra estaba mucho más fría.		
F	La composición isotópica de burbujas de aire atrapadas en el hielo antártico es diferente a la de ahora.		
G	Las estriaciones de los valles alpinos se deben al pasaje de los glaciares.		

2. ¿Alguna de las afirmaciones les resultó más difícil para determinar si era una teoría o una observación? ¿Cuál o cuáles y por qué?
3. ¿Cuál era el argumento principal, según el texto, por el cual los geólogos de la época no aceptaban la idea de una Era del Hielo?

4. Si les interesa el tema, busquen qué otras eras del hielo hubo, cuánto duraron y cuál fue la más fría. ¿Alguna vez estuvo congelada toda el agua de la Tierra?
5. ¿Qué elementos en común ven entre la teoría de la Era del Hielo y la del sistema solar pitagórico? ¿Qué diferencias encuentran?

Bibliografía

- Bolles, E. B. (1999), *The Ice Finders: How a Poet, a Professor, and a Politician Discovered the Ice Age*, Washington, DC, Counterpoint.
- Carozzi, A. V. (1966), "Agassiz's Amazing Geological Speculation: The Ice-Age", *Studies in Romanticism*, 5(2): 57-83.

Índice

Este libro (y esta colección)	11
Agradecimientos	15
Introducción	17
Había una vez...	17
Las teorías como relatos	19
Señal y ruido	20
Las mil y una historias	22
1. Teorías científicas en la vida y en el aula	25
Qué es una teoría: sobre dinosaurios y átomos	27
Observables y nociones teóricas	29
Las teorías no encajan con todos los datos	31
Teoría mata dato	32
Sí hay certezas	33
Cómo sabemos lo que sabemos: crecimiento y validación de los cuerpos teóricos	34
Otras características de los cuerpos teóricos	37
Las teorías científicas en el aula	39
Historia de la ciencia y narraciones en la enseñanza	40
Para ir cerrando	42
2. El sistema solar pitagórico	43
<i>Mirar el cielo e imaginar el cosmos</i>	46
Comentarios y ejercicios	49
<i>Propuestas para el aula</i>	51
3. La Era del Hielo	55
<i>Bajo un manto de hielo</i>	58

Comentario y ejercicios	62
<i>Propuestas para el aula</i>	64
4. La tabla periódica	67
<i>Un lugar para cada cosa</i>	70
Comentario y ejercicios	73
<i>Propuestas para el aula</i>	75
5. Dominios magnéticos	77
<i>Viaje al interior de los imanes</i>	80
Comentario y ejercicios	82
<i>Propuestas para el aula</i>	83
6. El sistema solar de Ptolomeo	87
<i>La máquina de predecir trayectorias</i>	90
Comentario y ejercicios	92
<i>Propuestas para el aula</i>	94
7. El ancestro común	95
<i>El árbol de la vida</i>	98
Comentario y ejercicios	103
<i>Propuestas para el aula</i>	105
8. La doble hélice	107
<i>Sueños helicoidales</i>	110
Comentario y ejercicios	113
<i>Propuestas para el aula</i>	116
9. El sistema copernicano	119
<i>De repente ya no somos el centro</i>	122
Comentario y ejercicios	125
<i>Propuestas para el aula</i>	128
10. El calor	131
<i>¿Es el calor una cosa?</i>	134
Comentario y ejercicios	137
<i>Propuestas para el aula</i>	139

11. La genética de Mendel	141
<i>La arveja idealizada</i>	144
Comentario y ejercicios	148
<i>Propuestas para el aula</i>	150
12. Expandiendo las ideas de Mendel	151
<i>El tesoro de las excepciones</i>	154
Comentario y ejercicios	159
<i>Propuestas para el aula</i>	161
13. Teoría cromosómica de la herencia	163
<i>Las células y la herencia</i>	166
Comentario y ejercicios	170
<i>Propuestas para el aula</i>	173
14. La deriva continental	175
<i>Continentes a la deriva</i>	178
Comentario y ejercicios	182
<i>Propuestas para el aula</i>	184
15. La teoría atómica	187
<i>Bolitas diminutísimas</i>	190
Comentario y ejercicios	193
<i>Propuestas para el aula</i>	194
16. El Big Bang	197
<i>Galaxias en fuga</i>	200
Comentario	202
17. De caracoles y berilio	205
Un caracol insólito y la ingenuidad del alumno	207
Orden: un fin deseable para la enseñanza y la investigación	208
Un metal misterioso y el ingenio del maestro	209
Teoría y datos	210
De alumno a maestro	211
En el aula	212
<i>Un experimento muy simple</i>	213

18. Cierre	217
El uso de las viñetas para estructurar secuencias de clases	220
Otros usos de las viñetas	223
¿Cómo se pueden construir viñetas históricas?	224
El amigo gurú	226
Simplemente no te quiere	228
Palabras finales	230
 Referencias	 233
 Créditos de las imágenes	 239