

La ilusión del cambio en un universo relativista atemporal¹

The Illusion of Change in a Relativistic Atemporal Universe

Olimpia Lombardi²
Nicolás Moyano Loza³

RESUMEN

El objetivo de este trabajo consiste en analizar la posición de Julian Barbour, según la cual vivimos en un universo atemporal, donde el devenir temporal y, con ello, el cambio son sólo una gigantesca ilusión cósmica. Desde el punto de vista de la física, se argumentará que su reconstrucción atemporal de la relatividad general no es equivalente a la teoría general de la relatividad tal como fuera formulada por Einstein. Desde un punto de vista filosófico, se considerarán las posibles motivaciones del autor para postular un universo donde el tiempo y el cambio no son más que apariencias subjetivas de una realidad atemporal.

Palabras clave: Barbour, universo atemporal, cambio, relatividad general, apariencia subjetiva.

ABSTRACT

The purpose of this article is to analyze the position of Julian Barbour, according to which we live in an atemporal universe, where the passage of time and, with it, change are only a great cosmic illusion. From a physical viewpoint, we argue that his atemporal reconstruction of general relativity is not equivalent to the general theory of relativity as formulated by Einstein. From a philosophical standpoint, we consider the possible motivations that lead the author to posit a universe where time and change are nothing but subjective appearances of an atemporal reality.

Keywords: Barbour, Atemporal Universe, Change, General Relativity, Subjective Appearance.

¹ Fecha de recibido: 11 de marzo de 2012. Fecha de aceptación: 20 de abril de 2012.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet) - Universidad de Buenos Aires. Correo electrónico: olimpiafilo@arnet.com.ar.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Conicet) - Universidad Nacional de Mar del Plata. Correo electrónico: nicolasmoyanoloza@gmail.com.

INTRODUCCIÓN

Ya desde la antigüedad la idea de cambio se ha relacionado estrechamente con el concepto de tiempo. Para Aristóteles, el tiempo es el número del movimiento según el antes y el después, donde «movimiento» tiene el sentido de nuestra noción actual de cambio. Desde entonces, si bien el tiempo no se identifica con el cambio, suele admitirse que existe un fuerte vínculo entre ambos: o bien el cambio sucede en el tiempo y, en consecuencia, el tiempo parece ser una condición de posibilidad para el cambio, o bien el tiempo es una medida del cambio y depende esencialmente de él.

No obstante, todo intento de comprender el cambio sobre la base de sus relaciones con el tiempo se enfrentará con un obstáculo particularmente serio: el concepto de tiempo ha resultado ser uno de los más elusivos en la historia del pensamiento humano. Desde Aristóteles, pasando por San Agustín y hasta nuestros días, muchos autores han intentado aprehender la noción de tiempo con resultados diferentes pero siempre parciales. «Tiempo» es un término singular, pero ¿existe una entidad denotada por tal palabra?; y si existe, ¿qué tipo de entidad es?

Estas preguntas, que desvelaron a filósofos de todas las épocas, no interfirieron sin embargo en el desarrollo de la física desde los tiempos de Newton. Incluso quienes no adhirieron a la idea newtoniana de un tiempo “absoluto, verdadero y matemático, que en sí mismo y por su propia naturaleza fluye uniformemente sin relación con nada externo” (Newton [1687] 1987, 228), siguieron utilizando una noción absoluta de tiempo que podía ser cómodamente representada como variable independiente en las ecuaciones diferenciales de movimiento. De este modo, la reflexión acerca de la naturaleza del tiempo quedó confinada a la filosofía durante varios siglos.

Esta situación comenzó a revertirse a partir de la segunda mitad del siglo XX, como consecuencia de un problema central de la física teórica: el problema de la unificación entre teoría cuántica y relatividad general. Como es bien sabido, hasta el presente ningún intento de unificación ha sido enteramente exitoso: ambas teorías parecen contener elementos tan fuertemente disímiles que impiden subsumirlas bajo un único marco teórico más general. Entre tales elementos se encuentra precisamente el concepto de tiempo. En efecto, uno de los mayores escollos para la unificación consiste en el hecho de que la teoría cuántica y la relatividad general incorporan dos conceptos diferentes e irreconciliables de tiempo. En teoría cuántica, el tiempo es el parámetro de evolución de un sistema y, por tanto, «externo» al sistema mismo, lineal y absoluto. En relatividad general, por el contrario, el tiempo se convierte en

una dimensión de una variedad cuatridimensional, el espacio-tiempo, que se curva a gran escala frente a la presencia de masas.

En este trabajo se presentarán las tesis de Julian Barbour, físico y pensador independiente que durante las últimas décadas ha elaborado sobre el tema una posición fuertemente provocadora. Si los obstáculos para la unificación se basan principalmente en los problemas relacionados con el concepto de tiempo, tal vez el camino más directo para superarlos consista en admitir sencillamente que el tiempo no existe. Según Barbour, vivimos en un universo atemporal, donde no existe el pasado ni el futuro sino sólo el presente; en este universo el devenir temporal y, con ello, el cambio son sólo una gigantesca ilusión cósmica.

El objetivo de este trabajo consiste en analizar las tesis de Barbour, tanto desde el punto de vista de la física como desde una perspectiva filosófica. En particular, se argumentará que la reconstrucción atemporal de la relatividad general que brinda el autor no es equivalente a la teoría general de la relatividad tal como fuera formulada por Einstein y como es aceptada en la actualidad en la comunidad científica. Por último, la propuesta de Barbour será evaluada desde un punto de vista filosófico, a fin de reflexionar acerca de las motivaciones para postular un universo donde el tiempo y el cambio no son más que apariencias subjetivas sobre una realidad atemporal.

EL PRINCIPIO DE MACH

El principio de Mach se vincula con el famoso debate filosófico relacionismo-absolutismo, y parece recoger el guante lanzado por Leibniz en cuanto a la interpretación relacional del espacio y del tiempo. No obstante, ideas relacionales pueden ya reconocerse en Aristóteles, con su concepción del tiempo como medida del movimiento. Algunos autores encuentran, incluso, rastros de relacionismo en autores modernos como Copérnico y Kepler (cf. Barbour 1995a).

Sin embargo, el debate se instala con la controversia entre Leibniz y Newton, frecuentemente encarnada en el conocido ejemplo del balde rotante: según Newton, las fuerzas inerciales —centrífugas— que actúan sobre el agua en un balde en rotación pondrían de manifiesto la aceleración respecto del espacio absoluto. A fines del siglo XIX, Ernst Mach retoma el famoso ejemplo en su conocida obra *The Science of Mechanics* ([1883] 1960), donde sostiene que el comportamiento del agua en el balde no prueba la existencia del espacio absoluto, puesto que las mismas fuerzas centrífugas se obtendrían con la rotación del resto de las masas del universo: lo único relevante es el movimiento

relativo y, por tanto, rotación del balde y rotación del resto de las masas del universo son sólo dos formas diferentes de describir el mismo fenómeno físico.

Ahora bien, ¿quién es el autor del principio de Mach? Aunque la respuesta a esta pregunta parece trivial, no lo es tanto cuando se rastrean los textos de Mach en la búsqueda del famoso principio: las alusiones de Mach son vagas y a veces casi contradictorias, y no existe una formulación clara del principio que permita establecer inequívocamente su contenido. Los pasajes relevantes de *The Science of Mechanics* ponen de manifiesto que los esfuerzos argumentativos de Mach están más dirigidos a atacar las nociones newtonianas de espacio, tiempo y movimiento absolutos que a formular un principio de alcance cosmológico y metafísico. Las críticas de Mach se fundan en su supuesto acerca de la naturaleza y los objetivos de la física, expresado por el *dictum* “La física es experiencia organizada en un orden económico” (Mach 1882, 197). Si la física debe aspirar únicamente a suministrar descripciones económicas de la experiencia directa, las nociones newtonianas de espacio, tiempo y movimiento absolutos son meros excesos metafísicos que resultan totalmente superfluos a la luz del legítimo objetivo de la física.

John Norton (1995) se pregunta explícitamente si las afirmaciones de Mach deben interpretarse como la exigencia de una redescipción de la física newtoniana que prescindiera de los términos «espacio» y «tiempo», o como la propuesta de un nuevo mecanismo físico para explicar las fuerzas inerciales. Según el propio Norton, es muy difícil encontrar en los escritos de Mach indicios de la defensa de un nuevo mecanismo físico; por el contrario, sus afirmaciones parecen apuntar a una mera redescipción, adecuada al supuesto de la primacía de lo observable y de la necesidad de erradicar la metafísica de la física. Por lo tanto, no habría en Mach la postulación de un principio relacional respecto del espacio, el tiempo y el movimiento⁴.

Los historiadores de la física coinciden en afirmar que el principio fue en realidad formulado por Einstein, quien utilizó por primera vez la expresión «principio de Mach» en un artículo de 1918 sobre relatividad general⁵. Sin

⁴ Von Borzeszkowsky y Wahsner (1995) afirman que Mach no sólo no propuso un principio general, sino que tal principio se encontraría completamente en conflicto con la intención de Mach de liberar a la física de todo elemento metafísico.

⁵ Antes de la formulación de la relatividad general, el llamado «Principio de Mach» fue considerado como una idea marginal, en general rechazada por quienes se convertirían en los más fervientes defensores de las teorías de Einstein. Con excepción de unos pocos físicos como Immanuel y Benedict Friedlaender y August Föppl, la comunidad científica se mostró muy poco interesada en un principio no testeable por vía empírica. Por otra parte, en la comunidad filosófica el principio no parece haber sido un foco de debate. Incluso los miembros del Círculo de Viena, para quienes

embargo, en los escritos de Einstein pueden hallarse referencias previas y su formulación del principio atribuido a Mach fue variando a través de los años. La primera alusión se encuentra en un artículo de 1912 (*cf.* Norton 1995; Hofer 1995), donde el principio se formula como la exigencia de que la inercia de una masa puntual sea el efecto de la presencia de todas las restantes masas del universo. Esta alusión es seguida por una nota a pie de página donde Einstein, muy poco inclinado a las referencias en sus escritos, menciona explícitamente a Mach y el segundo capítulo de su *The Science of Mechanics*. Según Einstein, la teoría especial de la relatividad no cumplía aún las exigencias impuestas por el principio puesto que aún distinguía los sistemas inerciales como sistemas de referencia privilegiados; Einstein se propone, entonces, generalizar la relatividad de modo de asegurar la inexistencia de sistemas de referencia privilegiados. En este camino hacia la relatividad general, cuya formulación definitiva aparecerá en 1916, en 1914 Einstein asimila el principio de Mach al principio de equivalencia entre inercia y gravedad: las fuerzas inerciales son producidas por la interacción con las otras masas del universo (*cf.* Hofer 1995). A su vez, en 1918 Einstein considera el principio de equivalencia como un caso particular del requisito general de covariancia de las ecuaciones dinámicas y, por tanto, la covariancia pasa a ser la expresión matemática del principio de Mach⁶.

En el mismo artículo de 1918, Einstein también identifica el principio con la condición de que la métrica del espacio-tiempo (representada por el tensor métrico $g_{\mu\nu}$) se encuentre totalmente determinada por la distribución de materia-energía en dicho espacio-tiempo (representada por el tensor de energía-momento $T_{\mu\nu}$). Pero el propio Einstein tenía claro desde 1916 que tal requisito no era satisfecho por sus ecuaciones de campo en la medida en que tales ecuaciones tienen solución para un espacio-tiempo vacío ($T_{\mu\nu}=0$), solución que corresponde al espacio-tiempo plano de Minkowski: el espacio-tiempo de Minkowski es el espacio-tiempo más anti-machiano posible, puesto que posee una estructura métrica e inercial bien definida sin masa alguna que pudiera ser considerada como aquello que determina tal estructura. Por este

Mach constituía una inspiración intelectual, no recibieron con entusiasmo las ideas sugeridas por el principio. Por ejemplo, Philipp Frank, defensor de la relatividad einsteiniana, rechazaba la propuesta de un nuevo mecanismo físico para explicar la inercia que él creía encontrar en los trabajos de Mach. A su vez, Moritz Schlick criticaba explícitamente a Mach por ignorar la diferencia entre cuestiones cinemáticas y dinámicas, y consideraba que la propuesta de Mach se había convertido en un ejercicio de física *a priori*, contradiciendo las enseñanzas centrales del propio autor (*cf.* Norton 1995).

⁶ Hoy resulta claro que este razonamiento confunde sistemas de referencia con sistemas de coordenadas, y que el requisito puramente formal de covariancia general no se relaciona con el principio de equivalencia (*cf.* Norton 1993).

motivo, Einstein comienza a evaluar la necesidad de condiciones de contorno machianas que, suplementando las ecuaciones de campo, bloquearían las soluciones no-machianas como el espacio-tiempo de Minkowski o la solución de Kerr de un universo en rotación respecto de condiciones de contorno minkowskianas en el infinito.

Según Carl Hofer (1995), la disminución del entusiasmo de Einstein por el principio de Mach puede explicarse por dos motivos: por un lado, la dificultad de formular el principio de modo que la teoría general de la relatividad resultase perfectamente machiana; por otra parte, el creciente interés de Einstein en las teorías unificadas de campo, donde se presupone una actitud realista respecto del campo métrico.

BARBOUR: HEREDERO DE MACH

Actualmente siguen existiendo fervientes defensores del principio de Mach, quienes consideran que la relatividad general puede y debe ser concebida como una teoría perfectamente machiana. El mejor representante de esta posición es Julian Barbour, con su propuesta de una reconstrucción pura y totalmente relacional de la teoría general de la relatividad.

En el marco de las formas actuales de producción científica, el caso de Julian Barbour es realmente excepcional. Luego de estudiar matemática en Cambridge y de completar su Ph.D. sobre fundamentos de la teoría general de la relatividad en Colonia, Alemania, en 1968 Barbour decidió convertirse en un investigador independiente a fin de evitar las presiones académicas por publicar que entorpecerían sus objetivos de largo plazo. Es así que, desde hace ya varias décadas, firma sus artículos colocando, en lugar del nombre de una institución, el nombre y la dirección de su casa de familia, College Farm, en Oxfordshire, y mantiene económicamente a su familia traduciendo al inglés trabajos científicos escritos en ruso. Esta libertad de trabajo lo ha convertido en un pensador multidimensional, interesado tanto en ciencia como en filosofía, arte y literatura, cuyo excelente estilo como escritor hace de la lectura de sus obras una experiencia altamente gratificante. Su proyecto actual consiste en transformar su casa College Farm en el Instituto Leibniz, donde espera organizar pequeños encuentros científicos así como seminarios de fin de semana para un público general.

Es desde esta peculiar posición que Barbour, junto a un reducido grupo de colaboradores, se ha propuesto reformular las principales teorías de la física como teorías genuinamente relacionales respecto del espacio y del tiempo.

En particular, su objetivo es demostrar que la mecánica clásica newtoniana y la relatividad general son teorías perfectamente machianas, para lo cual debe comenzar por brindar una formulación adecuada del principio de Mach. Según Barbour, si bien Einstein brindó diversas formulaciones del principio, fue Poincaré ([1902] 1905) quien estableció un criterio inequívoco para la mecánica no-relativista de partículas, según el cual el estado de un sistema debe venir dado por las distancias entre partículas y sus derivadas, de modo tal que dicho estado en un instante determine el estado en cualquier otro instante. Sobre la base de esta idea, Barbour formula dos *criterios de machianidad* considerados como el verdadero contenido del principio de Mach (Barbour 1995b):

- *Primer requisito machiano*: La evolución dinámica del universo como un todo debe poder predecirse unívocamente sobre la base de condiciones iniciales puramente relativas.
- *Segundo requisito machiano*: El tiempo externo no existe; la evolución dinámica del universo es una secuencia de sus configuraciones relativas.

El primer requisito recoge el criterio de Poincaré. El segundo requisito introduce un elemento propio del relacionalismo leibniciano pero generalmente ausente en las discusiones acerca del principio de Mach: no sólo el espacio sino también el tiempo debe ser relacional.

Esta adhesión a la línea Leibniz-Mach en cuanto a la concepción relacional del espacio y del tiempo es el punto de partida de Barbour tanto para sus reflexiones metafísicas acerca de la inexistencia del tiempo como para sus trabajos técnicos en física dirigidos a la reformulación relacional de la mecánica clásica y la relatividad general.

PLATONIA: LA REALIDAD ATEMPORAL

Si bien Barbour ha presentado sus ideas acerca de la inexistencia del tiempo en múltiples ocasiones, la exposición más general y sistemática de sus reflexiones se encuentra en su libro *The End of Time* (2000), donde se propone explicar la apariencia del cambio y del paso del tiempo a partir de una realidad atemporal.

Cada vez que intentamos aprehender el concepto de tiempo, éste se nos escapa de las manos. Según Barbour, esta dificultad se debe a que no hay nada allí para ser aprehendido: la idea misma de tiempo es, en verdad, una ilusión. Para comprender esta tesis, es necesario desprenderse de la imagen que representa la realidad como una colección de cosas que se ubican en el

espacio y transcurren en el tiempo. En ésta tenemos tres tipos de entidades: el espacio, el tiempo, y las cosas. Barbour, en cambio, ofrece lo que para él es una imagen más fundamental: lo único real son los instantes de tiempo o «*ahoras*». Cada uno de tales *ahoras* es una configuración posible del universo, en sí misma estática y atemporal. Se podría suponer que los *ahoras* encajan en una entidad llamada «tiempo», la cual fluye implacablemente hacia adelante. Pero, razona Barbour, en verdad no son los *ahoras* los que están en el tiempo, sino a la inversa: el flujo del tiempo, el temible río del que nos hablaba Heráclito, está en el instante. Aunque pueda resultar extraña y a primera vista inaceptable, la idea anterior se hace más clara a través de la noción de *cápsula de tiempo*, que Barbour entiende como “cualquier patrón fijo que crea o codifica la apariencia de movimiento, cambio o historia” (Barbour 2000, 30). Estas cápsulas contienen documentos (capas geológicas, fósiles, etc.) que interpretamos como restos o reliquias de hechos pasados. Tales configuraciones estáticas dan lugar a nuestra creencia en el tiempo; son el material a partir del cual construimos la idea de una entidad invisible que avanza linealmente hacia el futuro. Así, la ilusión del tiempo se explica a partir de la existencia de ciertas estructuras que residen en los *ahoras* individuales.

Desde esta perspectiva, el escenario donde se juega la realidad del mundo atemporal “es el conjunto de todos los *Ahoras* posibles” (Barbour 2000, 177). El ejemplo preferido por Barbour es el de un universo que contiene únicamente tres partículas. Sobre la base de sus posiciones relativas, las partículas pueden encontrarse dispuestas de modo tal de formar un triángulo. Puesto que tres partículas pueden adoptar posiciones relativas muy diversas, existe una multiplicidad de triángulos posibles. Tales triángulos no ocurren en un instante de tiempo: ellos son los *ahoras* atemporales, y no hay nada más en la realidad.

No obstante, la totalidad de los *ahoras* no forma un mero conjunto o colección, sino que posee una estructura definida. En efecto, en el caso de los triángulos, éstos pueden organizarse según sus relaciones recíprocas, dando lugar al «espacio»⁷ de todos los triángulos posibles cuya estructura queda definida por tales relaciones. Barbour se refiere a este espacio de *ahoras* como un paisaje, como un país: “Llamaré Platonía al «país» correspondiente. El nombre refleja su perfección matemática y su paisaje atemporal. Nada cambia en Platonía” (Barbour 2000, 44). A su vez, Platonía tiene sus fronteras o límites constituidos por ciertos *ahoras* singulares. En el caso de los triángulos, las fronteras de Platonía vienen dadas por triángulos degenerados donde, por ejemplo, dos de las partículas coinciden o las tres partículas son colineales. El

⁷ Aquí el término «espacio» debe entenderse en su sentido matemático, y no en su sentido físico.

caso particular en el que las tres partículas se yuxtaponen en un único punto constituye un límite absoluto de Platonía, que Barbour denomina «punto Alfa». Desde esta perspectiva, el fenómeno que denominamos «*Big Bang*» no es una explosión violenta ocurrida en un pasado remoto: el *Big Bang* es simplemente un punto muy especial de Platonía, un punto Alfa.

¿Cómo surge la idea de la historia del universo en una realidad atemporal como Platonía? Sin duda, la noción de historia como sucesión temporal de cambios del universo es una ilusión: “cuando el tiempo desaparece, el movimiento desaparece” (Barbour 2000, 69). La apariencia de cambio viene representada por un camino o trayectoria en Platonía. Pero, a partir de un cierto *ahora*, hay múltiples trayectorias posibles en Platonía; la idea de historia se asimila a la trayectoria «más corta», esto es, a la sucesión de puntos ordenados según su similitud intrínseca. Barbour denomina «criterio de *mejor correspondencia* (*best matching*)» a este modo de ordenar los *ahoras* para crear la impresión de una evolución temporal. Una analogía sencilla que permite visualizar la idea de Barbour puede formularse en términos de fotografías. Supongamos que, por algún percance, de pronto todas las fotografías de nuestra familia quedaran desordenadas. Es evidente que cada fotografía es una cápsula de tiempo en el sentido antes mencionado. Si quisiéramos ordenarlas, primero las extenderíamos sobre alguna superficie, ubicándolas según algún criterio que las relacionara entre sí. Luego, comenzando por alguna de ellas, intentaríamos reconstruir la secuencia en la que fueron tomadas ordenándolas por similitud: ubicaríamos en forma consecutiva, por ejemplo, aquéllas donde nuestros hijos se ven más pequeños, y colocaríamos más adelante aquéllas donde los vemos diferentes y ya crecidos. De este modo reconstruiríamos la «historia» de nuestra familia, pero a partir de elementos completamente estáticos como las fotografías y sus relaciones de similitud. Sin duda, el tiempo no subyace a la pila de fotografías que logro tener en mis manos luego de haberlas ordenado; no obstante, “si veo una fotografía y luego otra, levemente diferente de la anterior, esto es ya suficiente para dar la idea de que el tiempo ha pasado” (Barbour 1994, 406).

Es interesante señalar que Barbour es explícitamente realista respecto de Platonía. Platonía es la verdadera realidad atemporal; incluso la flecha del tiempo no es más que una asimetría de la estructura atemporal de Platonía (Barbour 1994). Esta realidad, donde las configuraciones espaciales de los *Ahoras* son puramente relacionales y donde el tiempo no existe, constituye, según Barbour, el sustrato metafísico que subyace a los criterios de machianidad: “Platonía es el escenario en el cual formular las ideas de Mach” (Barbour 2000, 113). Sobre esta base aborda la tarea de transferir estas ideas metafísicas al ámbito de la física, en su reconstrucción relacional de la mecánica clásica y de la relatividad general.

HACIA UNA FÍSICA RELACIONAL

Según Barbour, una metafísica basada en la idea de Platonia no debería resultar extraña a los físicos, en la medida en que éstos están habituados a trabajar con el concepto abstracto de *espacio de configuraciones*. La configuración instantánea de un sistema mecánico clásico de partículas con n grados de libertad se especifica indicando las n coordenadas generalizadas q_1, \dots, q_n en ese instante y puede, por lo tanto, representarse mediante un punto p en una variedad diferenciable de n dimensiones. Esta variedad es el espacio de configuración Q del sistema, donde hay una y sólo una curva parametrizada por el tiempo t que pasa por p y satisface las ecuaciones de movimiento. El camino de esa curva representa la sucesión de todas las configuraciones del sistema, esto es, su evolución antes y después del instante correspondiente a p . En otras palabras, el tiempo funciona como un parámetro externo, pero el espacio de configuraciones en sí mismo es completamente atemporal.

En su primer paso hacia una física relacional, Barbour aborda la mecánica clásica newtoniana (Barbour & Bertotti 1982). La estrategia consiste en reconstruir la mecánica clásica sobre la base de los dos criterios de machianidad a fin de convertirla en una teoría genuinamente relacional. En lugar de trabajar en el espacio de configuraciones Q habitual, definido respecto de un cierto sistema de referencia, la idea central consiste en trabajar en un «*espacio de configuraciones relativas*» Q_0 , donde cada configuración viene dada por las distancias relativas entre partículas. Pero puesto que se ha prescindido del sistema de referencia, no es posible aún hablar de la diferencia entre dos configuraciones de Q_0 . Esto se logra definiendo la «*diferencia intrínseca*» entre configuraciones sobre la base de minimizar una función distancia que depende del sistema de referencia⁸. La diferencia intrínseca entre configuraciones mide su distancia en el espacio de configuraciones relativas Q_0 y, por tanto, define una métrica sobre Q_0 . Al independizarse de todo sistema de referencia, Q_0 recoge el carácter relacional del espacio.

Respecto de la dinámica sobre Q_0 , dado que el tiempo «externo» al sistema no existe, la evolución no puede definirse como la secuencia temporal de tales

⁸ Considérense dos configuraciones q^1 y q^2 pertenecientes a Q_0 . Si se toman dos sistemas de referencia correspondientes a ambas configuraciones, pueden definirse las diferencias $\delta x_i = x_i^2 - x_i^1$, donde x_i^2 es la posición de la partícula i respecto del sistema de referencia utilizado para representar q^2 y x_i^1 es la posición de la partícula i respecto del sistema de referencia utilizado para representar q^1 . La función distancia $D = \sqrt{(1/2) \sum_i m_i \delta x_i^2}$ es una medida de la diferencia entre ambas configuraciones, diferencia que depende de los sistemas de referencia elegidos. La diferencia intrínseca se obtiene minimizando la función D .

configuraciones. Por lo tanto, la dinámica se recupera mediante un ordenamiento basado en el criterio de mejor correspondencia según el cual dos configuraciones son inmediatamente adyacentes en el ordenamiento cuando su diferencia intrínseca es mínima. La evolución del sistema resulta, entonces, la secuencia de configuraciones ordenadas por el criterio de mejor correspondencia. Dicha evolución responde a un principio variacional que se convierte en un principio geodésico en Q_0 , esto es, un principio que define las geodésicas –trayectorias más cortas entre dos puntos– en el espacio de configuraciones relativas⁹. Tal principio geodésico coincide con el principio de mínima acción de la mecánica clásica standard. Al definir una dinámica que prescinde de la variable paramétrica temporal, esta reconstrucción recoge el carácter relacional del tiempo. Según diversos autores, la dinámica intrínseca de Barbour y Bertotti es una teoría genuinamente relacional con ciertas ventajas sobre la teoría newtoniana (Pooley & Brown 2002).

El paso siguiente de Barbour consiste en aplicar la misma estrategia de reconstrucción a la relatividad general. En este caso, cada configuración viene dada por una variedad diferencial tridimensional Σ dotada de una métrica h_{ij} ($i, j=1, 2, 3$), que en la formulación habitual de la relatividad general es una hipersuperficie de simultaneidad. Pero desde una perspectiva relacionalista deben identificarse todas las variedades que sólo difieren en el modo en que la métrica h_{ij} se «ubica» sobre Σ (Pooley 2002). De este modo se obtienen las configuraciones intrínsecas o relativas y se construye el espacio de configuraciones relativas correspondiente a la relatividad general. A partir de aquí, la estrategia es similar a la utilizada en el caso clásico: la historia del universo se reconstruye como la evolución de las geometrías tridimensionales sobre la base de una dinámica intrínseca basada en el criterio de mejor correspondencia (Barbour 1999a). Según Barbour (1995b), esta reconstrucción machiana de la relatividad general evita el problema de los modelos supuestamente no-machianos, en particular el problema de los espacio-tiempos carentes de materia: según el autor, incluso el espacio-tiempo aparentemente más anti-machiano, el espacio-tiempo de Minkowski, admite ser interpretado como la evolución dinámica de geometrías tridimensionales. Barbour considera que esta reconstrucción relacional de la relatividad general, como una teoría atemporal en la Platonía adecuada, recoge el espíritu einsteniano. En este sentido,

⁹ Un principio variacional prescribe los términos y la solución de un problema de cálculo de variaciones: dada una función F con valores reales, definida sobre una familia de curvas que unen dos puntos dados, hallar entre éstos aquella curva C tal que $F(C)$ es un máximo o un mínimo. El Principio de Hamilton, que da expresión matemática al principio de mínima acción formulado por Maupertius, es el más conocido e importante de los principios variacionales de la mecánica clásica (Mosterín y Torretti 2002).

recuerda la famosa carta de Einstein a la viuda de su amigo Besso, donde se refiere al tiempo como una «persistente ilusión».

RELATIVIDAD Y MACHIANIDAD

Si bien parece existir un consenso acerca de las virtudes de la reconstrucción relacional de la mecánica clásica llevada a cabo por Barbour y Bertotti, subsiste la pregunta: ¿es en realidad la relatividad general una teoría perfectamente machiana? En efecto, en su aplicación a la relatividad general el programa de Barbour ha sido objetado desde diversos frentes. Por ejemplo, se ha señalado que, cuando se acepta que las entidades básicas descritas por la teoría son las variedades tridimensionales Σ con sus correspondientes métricas h_{ij} y que la geometría puede definirse incluso en el caso de vacío de materia, entonces la teoría se convierte en una teoría relacional respecto del tiempo pero que trata al espacio desde una perspectiva sustancialista (cf. Pooley 2002). También se señala que, mientras la relatividad general admite diferentes foliaciones del espacio-tiempo —esto es, distintas formas de definir las variedades tridimensionales— y las evoluciones definidas por tales foliaciones son todas igualmente legítimas, en la teoría de Barbour existe una foliación privilegiada que define *la* historia del universo (cf. Kuchař 1995). Sin embargo, existe un argumento mucho más básico para objetar el programa de Barbour como reconstrucción machiana de la relatividad general: tal argumento se refiere a la *posibilidad* misma de foliación del espacio-tiempo.

Como es bien sabido, la relatividad general reemplaza la concepción de «espacio a través del tiempo» por el concepto de espacio-tiempo, donde el tiempo se convierte en una dimensión de una variedad cuatridimensional que se curva a gran escala como consecuencia de la presencia de masas. Por lo tanto, muchas topologías diferentes son consistentes con las ecuaciones de campo de Einstein. En particular, el espacio-tiempo puede curvarse a lo largo de la dimensión espacial de modo tal que sus secciones espaciales se conviertan en análogos tridimensionales de una cinta de Moebius; en términos técnicos, se dice que el espacio-tiempo es temporalmente no-orientable. Un espacio-tiempo es *temporalmente orientable* si puede definirse sobre él un campo vectorial tipo-tiempo (*timelike*) respecto de su métrica. Esta definición implica que, en un espacio-tiempo temporalmente no-orientable, es posible convertir un vector tipo-tiempo que apunta hacia el futuro en un vector tipo-tiempo que apunta hacia el pasado a través de una transformación continua; por lo tanto, la distinción entre semiconos pasados y futuros no puede establecerse a nivel global (Castagnino & Lombardi 2004; 2009).

Pero aun si el espacio-tiempo es temporalmente orientable, puede poseer características tales que impiden particionar el conjunto de todos los eventos en clases de equivalencia tales que: (i) cada una de las clases sea una hipersuperficie tipo-espacio (*spacelike*), y (ii) las hipersuperficies puedan ser ordenadas temporalmente. Esto sucede cuando existen curvas temporales cerradas o, incluso sin ellas, cuando es imposible definir una función que asigne a cada evento un número, que representa el tiempo del evento, tal que el número asignado a e_1 sea inferior al asignado a e_2 cuando existe una señal causal propagable de e_1 a e_2 . En tales casos, no existe una partición global en hipersuperficies espaciales, cada una de las cuales contiene todos los eventos simultáneos entre sí (Sklar 1974). Es posible definir una jerarquía de condiciones que, aplicadas a un espacio-tiempo temporalmente orientable, evitan estas situaciones «anómalas». En particular, un espacio-tiempo temporalmente orientable (M, g) , donde M es una variedad cuatridimensional diferenciable y g es su métrica, posee una *función tiempo global* si existe una función $t: M \rightarrow \mathbb{R}$ cuyo gradiente es tipo-tiempo en todo punto de M (Hawking & Ellis 1973). Esto significa que existe una función cuyo valor aumenta en el mismo sentido a lo largo de cualquier curva temporal; la existencia de tal función garantiza que el espacio-tiempo es particionable en hipersuperficies de simultaneidad ($t=const.$) que definen una *foliación* (cf. Schutz 1980).

Resulta claro que la existencia de tiempo global y, por tanto, la posibilidad de foliación impone restricciones topológicas significativas al espacio-tiempo. En casos completamente generales no es posible definir un tiempo global en términos del cual la historia del universo como un todo puede concebirse como la secuencia temporal de sus estados instantáneos (Castagnino, Lombardi & Lara 2003). Pero ésta es precisamente la situación que surge de la reconstrucción relacional de Barbour: al partir de variedades tridimensionales Σ , Barbour presupone desde el comienzo la foliabilidad del espacio-tiempo en hipersuperficies tipo-espacio cuya secuencia define la historia del universo. En otras palabras, la propuesta de Barbour brinda una reconstrucción relacional del tiempo de la física clásica, concebido como el parámetro de evolución de los sistemas físicos, pero no del *tiempo-dimensión* de la relatividad general. Y esta cuestión no es menor cuando se considera que tal vez el mayor obstáculo para lograr la unificación entre relatividad general y mecánica cuántica y formular así una gravedad cuántica consistente resida en la diferencia en el concepto de tiempo utilizado en ambas teorías (Isham 1992; 1999).

Al describir el espacio-tiempo que respondería al principio de Mach, diversos autores asumen implícitamente su foliabilidad. Por ejemplo, Earman (1989) define el *espacio-tiempo machiano* como una variedad cuatridimensional

diferenciable que puede partitionarse en una familia de hipersuperficies tridimensionales de simultaneidad; tal definición, aplicada al caso de la relatividad general, conduce a un espacio-tiempo foliable. Por su parte, Isenberg (1995) se refiere al Principio WEM (Wheeler-Einstein-Mach) como un principio que sólo puede satisfacerse en un espacio-tiempo descriptible como una variedad $M^4 = \Sigma^3 \times \mathbb{R}$, cuya estructura es *establemente causal*; pero dado que la condición de estabilidad causal es equivalente a la condición de existencia de tiempo global (Hawking & Ellis 1973), el requisito impuesto por Isenberg equivale nuevamente a la foliabilidad del espacio-tiempo.

La necesidad de foliabilidad no suele ser discutida como limitación del programa de Barbour (una excepción es Butterfield 2001). Sin embargo, esta cuestión conceptual resulta central cuando el problema consiste en evaluar la posibilidad de reconstruir la relatividad general como una teoría completamente machiana. El supuesto de foliabilidad del espacio-tiempo adoptado por Barbour en su propuesta pone de manifiesto que su teoría posee *menos modelos* que la relatividad general y, por tanto, no puede ser considerada como una efectiva reconstrucción de la teoría de Einstein: la teoría general de la relatividad sigue mostrándose esquiva a la interpretación totalmente machiana que pretende Barbour.

RELACIONALISMO, TIEMPO Y CAMBIO

Si la teoría de Barbour no puede ser considerada como una adecuada reconstrucción de la relatividad general, se impone la pregunta epistemológica general acerca de las motivaciones del autor. Si su meta es demostrar que la relatividad general es una teoría perfectamente machiana, tal como se infiere de muchos de sus escritos, parece claro que no ha conseguido cumplir su objetivo, puesto que su teoría sólo recoge un subconjunto de los modelos de la teoría einsteniana. Si su interés es brindar una teoría de la gravedad adecuada para el desarrollo de la gravedad cuántica, sus esfuerzos resultan injustificados en la medida en que ya desde hace tiempo existen diversos enfoques teóricos para ello (ADM, geometrodinámica, etc.).

Sin embargo, la motivación central de Barbour podría no fundarse en cuestiones técnicas de la física sino tener raíces filosóficas basadas en una posición metafísica profundamente relacionista. Por supuesto, tal motivación no disminuye la relevancia de su propuesta; por el contrario, el intento de reformular la física fundamental en términos puramente relacionales resulta un esfuerzo valioso desde el punto de vista filosófico. Sin embargo, si esta fuera su verdadera motivación, Barbour debería admitir que su programa apunta

al *reemplazo* de la teoría general de la relatividad de Einstein por una nueva teoría consistente con el espíritu machiano; pero ésta es una postura tan fuerte que muy pocos están dispuestos a adoptar.

Estas consideraciones, no obstante, no agotan las preguntas que surgen frente a la propuesta de Barbour. Aun admitiendo las raíces relacionistas de su postura, ¿implica el relacionismo una negación del tiempo? ¿implica una negación del cambio? Empecemos por esta segunda pregunta. Barbour afirma que, contrariamente a lo que todos experimentamos, no hay cambio. Supongamos que mi gato, Roberto, pierde la cola en un accidente. Sería razonable sostener que después del accidente Roberto ha cambiado. ¿Cómo dudar de algo tan evidente? La clave está en Platonía: cada *ahora* existe en sí mismo, de manera estática y atemporal. Un gato (o cualquier objeto) es una pequeña parte de una configuración instantánea, de modo que también es atemporal. Así, Roberto con cola y Roberto sin cola son dos gatos atemporales que forman parte de diferentes *ahoras*. Lo que existe es cada una de estas configuraciones gatunas inmutables, cada una diferente de la otra; pero Roberto, al igual que el tiempo, no es real. De este modo, el cambio es imposible, ya que no hay una cosa que haya perdido la cola. De manera más general, Barbour afirma que la idea de identidad a través del tiempo se deriva de la similitud estructural de ciertos *ahoras*, lo que genera la ilusión de substancia metafísica y de persistencia (Barbour 2000, 49).

Creemos que en este punto hay un error en el modo en que Barbour concibe la persistencia y el cambio. Para ser precisos, lo que descarta Platonía es la antigua noción de substancia o la idea de una entidad tridimensional que transcurre a través del tiempo. Esto, por otro lado, no tiene nada de extraño, ya que en Platonía no hay tiempo. Sin embargo, la ontología tetradimensional (*cf.* Sider 2001) explica y describe la persistencia y el cambio sin la necesidad de suponer que un objeto deba tener partes tridimensionales instantáneas idénticas. La idea es ésta: dado el *principio de fusión mereológica universal*, cualquier clase de objetos tiene una fusión. Por ejemplo, cada configuración de los diversos *ahoras* que pueda ser llamado «Roberto» tiene una fusión. Ésta tiene el carácter de un camino a través de Platonía. Así, el objeto al que llamamos «Roberto» y del que pensamos la persistencia no es ningún gato inmutable en un *ahora* particular, sino un agregado mereológico de partes instantáneas que habitan diferentes *ahoras*. Por otro lado, dado que la ontología tetradimensional acepta que la *composición es identidad*, no hay que suponer que una entidad misteriosa atraviesa los diferentes *ahoras*: Roberto no *es* algo más allá de cada una de sus partes.

Independientemente de que se acepte o no la ontología tetradimensional, queremos remarcar que no es del todo claro que una postura relacional

como la que plantea Barbour descarte el cambio. En todo caso, la descripción del cambio se vuelve más complicada, ya que asume el carácter de un camino que es, que existe, en Platonía.

Veamos ahora a la cuestión del tiempo. Es cierto que, en la correspondencia con Clarke, los ataques de Leibniz al espacio absoluto incluyen la crítica según la cual espacio y tiempo no son totalmente reales sino que son entidades «ideales». En su introducción a la correspondencia, Alexander afirma que “la idealidad del espacio y del tiempo se sigue, para Leibniz, del hecho de que no son ni sustancias individuales ni agregados de sustancias individuales; sólo éstos son totalmente reales” (1984, xxv). Pero la postura de Leibniz acerca del carácter ideal del espacio y del tiempo depende, en parte, de su metafísica carente de relaciones, donde las únicas entidades reales son las sustancias individuales —mónadas— y sus propiedades no relacionales —monádicas—. Si se prescinde de la monadología, no hay razón alguna para negar la realidad de las relaciones y, con ello, del tiempo concebido en términos relacionales. Ahora bien, si bien Leibniz aún podría mantener su rechazo del tiempo por considerar que no existe más que una de sus partes —el presente—, Barbour no tiene tal opción: si existen tanto las relaciones como la totalidad de los *ahoras* inmutables, entonces el tiempo existe como una estructura relacional entre los miembros de Platonía.

En el caso de Mach, es claro que este autor dirige sus energías a atacar las nociones newtonianas de espacio y tiempo *absolutos*. Las críticas se basan en su «sensacionismo», según el cual los objetos que componen la realidad son complejos de sensaciones y no existen fuera de éstas, y en su idea de que la ciencia sólo aspira a brindar descripciones económicas de la experiencia. Por ello, espacio y tiempo absolutos son considerados por Mach como excesos metafísicos, superfluos para la economía de la física. Pero esto no significa aún que el tiempo no exista para Mach: el tiempo es un tipo de relación particular entre fenómenos y no la entidad sustancial y absoluta postulada por Newton.

Las posiciones de Leibniz y Mach no han sido los únicos casos de relacionalismo respecto del espacio y del tiempo en la historia de la filosofía. Por ejemplo, también Russell adoptó una postura relacionalista en su construcción de los conceptos de espacio y de tiempo a partir de los datos de la experiencia inmediata. Respecto del tiempo, Russell ([1914] 1993; [1948] 1994) define la noción de instante como el conjunto de todos los acontecimientos parcialmente contemporáneos. A su vez, la relación de contemporaneidad parcial se define en términos de la relación temporal básica de precedencia completa: dos acontecimientos son parcialmente contemporáneos si ninguno de los dos precede completamente al otro. Queda claro, entonces, que esta concepción relacional

del tiempo no niega su existencia en la medida en que las entidades básicas para su construcción son los acontecimientos y sus relaciones *temporales*¹⁰.

El exceso de la posición de Barbour respecto de la negación del tiempo se manifiesta claramente cuando se comparan sus tesis respecto del tiempo y del espacio. Al alinearse en el relacionismo Leibniz-Mach, Barbour adopta una posición relacionista tanto respecto del espacio como respecto del tiempo. El espacio no debe concebirse como una entidad sustancial y absoluta sino como la estructura que conforman las relaciones entre todos los objetos del universo. No obstante, la realidad del espacio nunca es cuestionada: jamás se afirma que Platonía, además de ser atemporal, es a-espacial. En efecto, el hecho de que las configuraciones que conforman Platonía se definan exclusivamente por las distancias relativas entre objetos, si bien prescinde del espacio absoluto, no significa que las distancias y, con ello, el espacio sean inexistentes. Sin duda, Barbour manifiesta una desconfianza peculiar respecto del concepto de tiempo y no respecto del concepto de espacio, desconfianza que lo hace concebir ambas nociones igualmente relacionales de un modo totalmente diferente desde un punto de vista metafísico.

Tal vez el origen del diferente tratamiento que Barbour otorga al espacio y al tiempo se encuentra en una confusión acerca del concepto de tiempo en las teorías clásicas pre-relativistas. En diversas ocasiones, tanto en escritos como en entrevistas, Barbour critica explícitamente la concepción de un fluir temporal: “la idea básica de mi teoría es que no hay tiempo como tal. No hay un río invisible de tiempo que fluye” (Barbour 1999b). En particular, concibe el tiempo de la mecánica clásica bajo esta imagen del movimiento o del fluir:

La evolución en mecánica newtoniana clásica es como un punto brillante que se mueve, a medida que el tiempo pasa, sobre el paisaje de Q [espacio de configuraciones]. He argumentado que éste es un modo incorrecto de pensar acerca del tiempo. No hay ni un tiempo que pasa ni un punto que se mueve, sino sólo un camino atemporal a través del paisaje (Barbour 2000, 229).

Estas afirmaciones ponen de manifiesto que Barbour adjudica al tiempo de la mecánica clásica, no sólo un carácter sustancial y absoluto, sino también la

¹⁰ Es interesante señalar que la estrategia de Russell para construir el tiempo es pasible de críticas análogas a la reconstrucción de Barbour de la relatividad general, críticas relacionadas con la topología del tiempo resultante. Dado que Russell presupone que la relación temporal de precedencia completa es una relación de orden, el tiempo que surge de su construcción resulta ser topológicamente abierto: la posibilidad de otras topologías queda anulada por los supuestos implícitos en la propia construcción (Lombardi 1997).

propiedad de ser algo que «fluye uniformemente sin relación con nada externo», tal como lo caracterizara inicialmente Newton. Pero las críticas de Barbour a un tiempo así concebido parecen ignorar que la idea del fluir temporal desapareció por completo de la física posterior a Newton. En efecto, en la física clásica pre-relativista el tiempo se representa mediante una variable que toma valores sobre la recta de los números reales y que, en este sentido, no se distingue de las variables que representan el espacio; la diferencia entre las variables espaciales y la variable temporal es que esta última cumple el papel de variable independiente en las ecuaciones diferenciales de movimiento. No obstante, nada hay que «fluya» o que «transcurra» en este tiempo que, representado por los números reales, se encuentra siempre presente como un todo en la descripción dinámica de los sistemas físicos. Es precisamente contra este tiempo «espacializado» de la física que se rebela Bergson cuando sostiene que es necesario recuperar la intuición del tiempo como devenir frente a una ciencia que considera los acontecimientos “en un tiempo extendido en espacio” ([1907] 1970, 784).

En definitiva, negar el tiempo como fluir no implica negar el tiempo de la mecánica clásica y, menos aún, negar la existencia del tiempo mismo. Si en la realidad relacional de la que nos habla Barbour el espacio existe pero el tiempo no, debe haber algún otro motivo, científico o filosófico para que ello sea así. Pero el propio Barbour no nos explica cuál es ese motivo.

CONCLUSIONES

Sin lugar a dudas, las tesis de Barbour son profundamente provocadoras. Si a través de la historia del pensamiento tantos autores han dirigido sus esfuerzos a elucidar la noción de tiempo, es porque tradicionalmente se ha supuesto que detrás del término «tiempo» hay algo que merece ser comprendido. Frente a esto, se presenta Barbour afirmando que el tiempo no existe, que vivimos en una realidad estática donde el movimiento es sólo una apariencia y el cambio es una mera ilusión. No sorprende, entonces, que esta posición despierte el interés tanto en el ámbito de la física como en el de la filosofía.

En el presente trabajo se ha intentado poner de manifiesto que el pensamiento de Barbour puede ser analizado desde diferentes perspectivas. Cuando se inscribe en la línea relacionalista Leibniz-Mach, Barbour ofrece un aporte relevante para la fundamentación de la física. Su reconstrucción relacional de la mecánica clásica muestra la posibilidad de formular la teoría prescindiendo de los tradicionales conceptos de espacio y tiempo absolutos. Y si bien su intento de reconstrucción de la relatividad general no conduce a una teoría equivalente a la

einsteniana, el formalismo resultante brinda nuevos elementos para reflexionar acerca de una teoría de la gravitación que responda a las exigencias del relacionismo. Sin embargo, cuando se evalúan sus tesis acerca del fin del tiempo y del carácter aparente e ilusorio del cambio desde una perspectiva filosófica, la posición de Barbour muestra sus flancos más endebles. Por un lado, la adopción de una concepción relacionista respecto del tiempo no implica, por sí misma, la negación del tiempo sino sólo el abandono de un concepto absoluto y sustancial de tiempo. Por otra parte, el rechazo de un tiempo concebido como un fluir no conduce a la necesidad de desprenderse del tiempo de las teorías clásicas pre-relativistas, puesto que tal concepto de tiempo fue abandonado por la física posterior a Newton. En definitiva, no parece haber motivos filosóficos suficientes para aceptar que vivimos en una realidad estática y a-temporal, y que nuestras vivencias íntimas e inevitables acerca del tiempo y del cambio no son más que meras ilusiones de las que debemos aprender a prescindir.

TRABAJOS CITADOS

- Alexander, H. G., Ed. *The Leibniz Clarke Correspondence*, Nueva York: Barnes and Noble, 1984.
- Barbour, J. “The Emergence of Time and Its Arrow from Timelessness”. J. J. Halliwell, J. Pérez-Mercader & W. H. Zurek, Eds., 1994.
- . “Mach before Mach”. J. Barbour & H. Pfister, Eds., 1995a.
- . “General Relativity as a Perfectly Machian Theory”. J. Barbour & H. Pfister, Eds. (1995b).
- . “The Development of Machian Themes in the Twentieth Century”. J. Butterfield, Ed. 1999a.
- . “A Talk with Julian Barbour”, Introducción y Entrevista de John Brockman, *Edge*, 60 (1999b). <http://www.edge.org/documents/archive/edge60.html>.
- . *The End of Time: The Next Revolution in Our Understanding of the Universe*. Oxford: Oxford University Press, 2000.
- Barbour, J. & Bertotti, B. “Mach’s Principle and the Structure of Dynamical Theories”. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 382 (1982): 295-306.
- Barbour, J. & Pfister, H., Eds. *Mach’s Principle. From Newton’s Bucket to Quantum Gravity*. Birkhäuser: The Center for Einstein Studies, 1995. Einstein Studies 6.

- Bergson, H. “L'Evolution Créatrice”. *Ouvres*, Paris: Ed. du Centenaire, [1907] 1970.
- Borzeszkowski, H. von & Wahsner, R. “The Stimulating Role of Two Misunderstandings”. J. Barbour & H. Pfister, Eds., 1995.
- Butterfield, J., Ed. *The Arguments of Time*. Oxford: Oxford University Press, 1999.
- . “The End of Time?”. *British Journal for the Philosophy of Science*, 53 (2001): 289-330.
- Castagnino, M. & Lombardi, O. “The Generic Nature of the Global and Non-Entropic Arrow of Time and the Double role of the Energy-Momentum Tensor”. *Journal of Physics A (Mathematical and General)*, 37 (2004): 4445-4463.
- . “The Global Non-Entropic Arrow of Time: from Global Geometrical Asymmetry to Local Energy Flow”. *Synthese*, 169 (2009): 1-25.
- Castagnino, M., Lombardi, O. & Lara, L. “The Global Arrow of Time as a Geometrical Property of the Universe”, *Foundations of Physics*, 33 (2003): 877-912.
- Earman, J. *World Enough and Space-Time*. Cambridge MA: The MIT Press, 1989.
- Halliwell, J. J., Pérez-Mercader, J. & Zurek, W. H., Eds. *Physical Origins of Time Asymmetry*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- Hawking, S. & Ellis, G. *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge: Cambridge University Press, 1973.
- Hoefer, C. “Einstein’s Formulations of Mach’s Principle”. J. Barbour & H. Pfister, Eds., 1995.
- Isenberg, J. “Wheeler-Einstein-Mach Spacetimes”. J. Barbour & H. Pfister, Eds., 1995.
- Isham, C. “Canonical Quantum Gravity and the Problem of Time”. *Los Alamos Archive*, arXiv: gr-qc/9210011, 1992.
- Isham, C. “On the Emergence of Time in Quantum Gravity”. J. Butterfield, Ed., 1999.
- Kuchař, K. Intervención en “General Discussion: What is the Machian Program?”. J. Barbour & H. Pfister, Eds., 1995.

- Lombardi, O. “La Construcción del Tiempo en Russell”. *Revista Latinoamericana de Filosofía*, 23 (1997): 211-237.
- Mach, E. *The Science of Mechanics: A Critical and Historical Account of Its Development*. 6ª ed. Illinois: Open Court, [1883] 1960.
- Mosterín, J. & Torretti, R. *Diccionario de Lógica y Filosofía de la Ciencia*. Madrid: Alianza Editorial, 2002.
- Newton, I. *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Madrid: Alianza Editorial, [1687] 1987,
- Norton, J. “General Covariance and the Foundations of General Relativity”. *Reports on Progress in Physics*, 56 (1993): 791-858.
- . “Mach’s Principle before Einstein”. J. Barbour & H. Pfister Eds., 1995.
- Poincaré, H. *Science and Hypothesis*. Londres: Walter Scott Publishers, [1902] 1905.
- Pooley, O. “Relationalism Rehabilitated? II: Relativity”. *Pittsburgh PhilSci Archive*, 2002.
- Pooley, O. & Brown, H. (2002), “Relationalism Rehabilitated? I: Classical Mechanics”. *The British Journal for the Philosophy of Science*, 53, 183-204.
- Russell, B. *Our Knowledge of the External World*. Londres: Routledge, [1914] 1993.
- . *Human Knowledge. Its Scope and Limits*. Londres: Routledge, [1948] 1994.
- Schutz, B. *Geometrical Methods of Mathematical Physics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980.
- Sider, T. *Four-Dimensionalism: An Ontology of Persistence and Time*. Oxford: Clarendon Press, 2001.
- Sklar, L. *Space, Time and Spacetime*. Berkeley: University of California Press, 1974.