

# HACIA UNA ONTOLOGÍA RELACIONAL DEL ESPACIO-TIEMPO

Por

Favio Ernesto CalaVitery<sup>1</sup>

## Resumen

Cala Vitery F. E.: Hacia una ontología relacional del espacio-tiempo. Rev. Acad. Colomb. Cienc. 32 (125): 527-543, 2008. ISSN 0370-3908.

En este artículo argumento –en contra de la opinión más generalizada– que la Teoría General de la Relatividad recibe su interpretación natural como una teoría relacional sobre el espacio-tiempo. Para ello me apoyo en tres argumentos: i) La ausencia de identidad primitiva para los puntos del espacio-tiempo en teorías covariantes. ii) El hecho de que el tensor métrico, al tener una estructura genuinamente dinámica, se entiende mejor como un objeto material en toda regla. iii) La posibilidad tanto hipotética como concreta de formular alternativamente –en el contexto de la dinámica clásica– la geometría y la inercia como estructuras relacionales y no como estructuras intrínsecamente sustantivistas.

**Palabras clave:** Ontología, Espacio-Tiempo, Relatividad General, Relacionismo, Substantivalismo.

## Abstract

I argue that –contrary to the widespread opinion– General Relativity should be interpreted as a relational spacetime theory. To do so, I rely on three arguments: i) The absence of primitive identity for spacetime points within generally covariant theories. ii) The fact that the metric tensor field, having a genuinely dynamical structure, should be better understood as a material object field in its own right. iii) The hypothetical and concrete possibility of formulating geometry and inertia –in the context of classical mechanics– as alternative relational structures rather than as intrinsically substantial structures.

**Key words:** Ontology, Spacetime, General Relativity, Relationism, Substantivalism.

<sup>1</sup> Universidad de Bogotá “Jorge Tadeo Lozano”. Colombia. Correo electrónico: favio.cala@utadeo.edu.co

## 1. Introducción

En la arena de la filosofía de la ciencia, ciertamente es común cuestionar la interpretación de la Mecánica Cuántica (MQ). Esto porque, a pesar del éxito generado por el uso, aplicación y desarrollo de su propio aparato formal, no estamos del todo persuadidos por la pintura que revela del mundo. Hay un problema de inteligibilidad. Su ontología, es decir, la interpretación de su formalismo, sigue siendo largamente discutida. Por otra parte, la interpretación de la Teoría General de la Relatividad (TGR), suele ser tomada por menos problemática a pesar de que importantes cuestiones estructurales no han estado exentas de un alto grado de controversia. Sin ir lejos, el cúmulo de dificultades para esclarecer el significado físico de la covariancia general, que seguramente es el rasgo más distintivo de la TGR, es buena muestra de esto.

La revolución científica operada conjuntamente por la teoría de gravitación de Einstein y la Mecánica Cuántica supuso una profunda transformación de las concepciones fundamentales de la física. Newton había construido la teoría científica más exitosa que ha conocido la humanidad. Con su dinámica logró asentar bien las nociones de espacio, tiempo, gravitación e inercia. Nociones todas estas indispensables para tratar el problema del movimiento y nociones todas estas que culminan su transformación posterior con la Teoría General de la Relatividad. En parte por esto, con el tiempo, la Teoría General de la Relatividad ha llegado a ser vista como la legataria natural de la dinámica newtoniana, mientras que la mecánica cuántica, al ocuparse fundamentalmente de cuestiones diferentes como la estructura de la materia y la naturaleza de la radiación, parece ajena a esta misma tradición.

Como resultado ha circulado la falsa impresión de que, al igual que la dinámica de Newton en su momento, la Teoría General de la Relatividad no tiene problemas de interpretación significativos.

El error es doble. Primero, porque procede de la falsa opinión de que las nociones de espacio, tiempo, inercia y movimiento 'bien establecidas' por Newton fueron, o maduraron hasta llegar a ser, inobjetables. Segundo, porque, una vez reconocidas algunas de las objeciones a la ontología de la dinámica newtoniana, procede de la no menos infundada suposición de que éstas han sido superadas del todo por su heredera natural, la Teoría General de la Relatividad. No es este el caso.

La dinámica de Newton, más allá de su eficacia predictiva, resultó desde un comienzo controvertible. Entre otras razones porque ésta -contra **Descartes**- parecía conferir realidad física independiente al espacio y al tiempo. **Huygens**, encontró absurda la idea de un movimiento 'verdadero' sin relación a cuerpos materiales, y por esta misma vía, **Leibniz** intentó rebatir, desde un inicio, la existencia física independiente del espacio y el tiempo absolutos argumentando que el soporte físico del movimiento debería estar anclado en la materia y sus relaciones. Así nació el debate sobre la existencia física del espacio. Debate este que quedó documentado en la serie epistolar que sostuvo el propio **Leibniz** durante sus dos últimos años de vida (1715-1716) con **Samuel Clarke**, fiel portavoz de **Newton**. Por entonces se estaban sentando los fundamentos de la física. Y es que es común afirmar que en buena medida la física moderna debe su origen al esfuerzo consistente por encontrar la unidad formal de un problema singular. Se trata del que la filosofía natural, desde **Aristóteles**, planteaba como el problema del movimiento local. Todo esto porque, antes de **Newton**, quienes se ocuparon de estudiar el movimiento local, que comprendía la caída de los graves, las órbitas planetarias y las trayectorias de proyectiles, buscaron expresar de una forma más o menos inteligible lo que significa que un cuerpo se mueva de un lugar a otro. En el fondo esta cuestión siempre estuvo latente la discusión sobre la naturaleza física independiente del espacio y el tiempo.

Discutiendo el asunto, **Newton** y **Leibniz** ya anticiparon buena parte de las dificultades interpretativas que nos siguen ocupando. Dejaron documentada su discusión al respecto en la polémica epistolar ya mencionada. La tradición recogió del enfrentamiento dos posiciones encontradas que pretendían responder a la siguiente cuestión: ¿Son el espacio y el tiempo entidades físicas reales en toda regla o son simplemente un conjunto de relaciones entre cuerpos materiales?

La herencia reciente de este debate germinal ha denominado **substantivalista** a la posición según la cual, siguiendo a **Newton**, el espacio es una entidad física que no debe su existencia a la presencia de objetos materiales y **relacionista** a la posición según la cual, siguiendo a **Leibniz**, el espacio no es otra cosa que el conjunto de relaciones entre objetos materiales coexistentes. Consideraciones similares sobre la naturaleza del tiempo son defendidas por los correspondientes costados del debate. Entretanto, mientras que para el substantivalista el espacio puede ser considerado como una especie

de contenedor o receptáculo para los objetos materiales y, en consecuencia, como el soporte universal de los fenómenos físicos, para el relacionista afirmar la sustancialidad (existencia) del espacio parece una concesión metafísica ociosa o un desafortunado desliz semántico. Para él, existe la materia y sus relaciones.

De este debate inicial entre relacionistas y substantivalistas (R-S) se acostumbra afirmar que hemos aprendido que el relacionista puede objetar, amparado en consideraciones epistemológicas, la invisibilidad del espacio. Ésta lleva al substantivalista a afirmar la existencia de situaciones físicas ontológicamente diferentes pero físicamente (empíricamente) indistinguibles. El espacio newtoniano permite este tipo de cosas y, discutiblemente, esto raya en el absurdo metafísico (Cala, 2006).

Por otra parte, **Newton** y la tradición substantivalista pudieron desechar esta objeción cargando a los relacionistas con la pesada loza de la inercia. Y esta no es una loza meramente epistémica. El cambio relacional, es decir, el cambio en la configuración relativa entre objetos materiales coexistentes resultaba insuficiente para proveer una justificación dinámica de los efectos inerciales. Baste con recordar los argumentos que **Newton** formuló en el escolio de sus Principia apoyado en el experimento del balde de agua en rotación y el de los dos globos atados por una cuerda, en un universo vacío, que giran en torno a su centro de gravedad común generando una tensión en la cuerda. En ambos casos parece insuficiente una justificación relacional de la inercia (Laymon 1978, Cala 2006).

El relacionismo de **Leibniz** fue recogido por el obispo **Berkeley** (1712), aunque sus objeciones al espacio absoluto newtoniano tomaron mejor forma, más tarde, con la crítica efectiva de **Mach** a la dinámica newtoniana. **Mach** no dudó en tildar de atavismo medieval a cualquier intento de conceder realidad física al espacio absoluto (Mach 1883, p.272). Y aunque el espacio invisible le pareciera una monstruosidad metafísica, hizo bien en reconocer que para proporcionar una ontología relacional alternativa se debía enfrentar el problema de la inercia. Esbozó un programa relacional que permitiría soportar la loza de la inercia. A sus críticas se sumo toda la tensión provocada por el desarrollo de la electrodinámica sobre los conceptos fundacionales de la mecánica. **Poincaré** y **Einstein** también se subieron al carro relacional, pero fue este último quien entendió, en la línea de **Mach**, que para erradicar la existencia física del espacio absoluto había que amarrar la estructura inercial de la dinámica a la distribución de materia estelar.

A la idea, **Einstein** terminó bautizándola como el Principio de Mach (**Einstein**, 1918). De hecho en 1916 ya había afirmado su satisfacción por haber estructurado una teoría relacional machiana en la forma definitiva de la Teoría General de la Relatividad (TGR). Hoy esta afirmación sigue siendo discutible. Y su discusión es el objeto central de este artículo.

Pero, ¿reivindica, finalmente, la Teoría General de la Relatividad el relacionismo à la *Leibniz-Mach* como **Einstein** pretendía? O, por el contrario, ¿en la tradición newtoniana, afirma la existencia independiente del espacio-tiempo, en este caso?

La cuestión parece estar lejos de ser zanjada. Y de esta cuestión me ocuparé en este artículo. Para ello, antes de entrar propiamente en los pormenores de la discusión actual, continúo con una breve historia de las tensiones que han caracterizado el debate en la era post-relativista.

**Einstein** había pretendido materializar el relacionismo inspirado en las ideas de Mach, al tiempo que buscaba una nueva teoría de gravitación. De paso trasladó la arena de discusión desde la sustancialidad del espacio y el tiempo hacia la sustancialidad del espaciotiempo. Durante el que quizá sea uno de los capítulos más interesantes de la historia de la gestación de la TGR, se sabe que **Einstein** logró sobreponerse a la limitada covarianza de sus ecuaciones de campo preliminares superando las objeciones que él mismo había impuesto mediante las restricciones debidas a su argumento del agujero (**Einstein** 1914).

Al rescatar la covarianza general en sus ecuaciones de campo definitivas **Einstein** había *salido de su propio agujero* argumentando que ‘todas nuestras verificaciones espaciotemporales invariablemente corresponden a la determinación de coincidencias espacio-temporales’ (**Einstein** 1918). Detalles sobre esta historia pueden hallarse en **Hoefler** 1994 y **Cala et al.** 2007.

La covarianza general es uno de los aspectos más distintivos de la teoría de **Einstein** y este tipo de aclaración vaga de su significado fue recogido con entusiasmo en tempranas interpretaciones de la teoría. En particular quienes se agrupaban bajo el positivismo lógico vieron en ésta una confirmación de la filosofía positiva de Mach y, presuntamente, una reivindicación del relacionismo à la Leibniz-Mach.

Al fin y al cabo, **Einstein** había superado las viejas nociones absolutas de espacio y tiempo newtoniano.

Este tipo de argumentación un tanto difusa fue defendida, entre otros, por **Hans Reichenbach**. Su libro sobre filosofía del espacio y del tiempo (**Reichenbach** 1928) enfatizaba el carácter empírico de la geometría física. En las notas introductorias a la edición inglesa, Rudolf Carnap, juzga al libro como la mejor contribución al tema hasta la fecha (1956)<sup>2</sup>. Así que en las tempranas interpretaciones positivistas de la TGR, la vertiente relacional fue felizmente patrocinada. Esta clima intelectual permaneció estable hasta que el desmoronamiento del positivismo lógico, el renacimiento del interés general por la cosmología relativista y el surgimiento del realismo científico obligaron a un replanteamiento de las cosas hacia finales de los años sesentas del siglo anterior.

En su lectura más inocente, el realismo científico interpreta las estructuras y objetos de nuestras mejores teorías literalmente. Es decir, le concede realidad física a las estructuras formales de la teoría. Los modelos de la TGR consisten en una variedad (manifold) y unos campos distribuidos sobre los puntos (eventos) de la variedad espaciotemporal. Desde la perspectiva realista pareció natural interpretar la variedad espaciotemporal como un espaciotiempo substantivista que aloja campos físicos. No es de sorprender que por entonces la variedad se interpretara como una entidad estructurada cuya existencia es independiente de la presencia de campos materiales. Ésta se había convertido en el sucedáneo del contenedor absoluto espacial de la física de Newton (**Earman** 1970, **Stein** 1970, **Friedman** 1983). La variedad es parte integral de nuestras mejores teorías y las ecuaciones de campo hacían ver a los campos como propiedades de los puntos -las partes- de la variedad espaciotemporal.

Este consenso sobre la existencia independiente del espaciotiempo en la forma de la variedad se rompió a finales de los años ochentas del siglo pasado. La filosofía del espaciotiempo se encontró entonces redescubriendo el viejo argumento del agujero de Einstein.

En su momento **Einstein** pensaba que la covarianza general implicada en el argumento violaba la ley de la causalidad. Igualmente, en su versión actualizada (**Earman y Norton** 1987), el argumento del agujero señalaba una dificultad interpretativa, a saber: si se suscribe una interpretación substantivista de la TGR,

ésta teoría debe ser juzgada como una teoría indeterminista. Esta conclusión es, desde luego, contraria a la concepción general de la teoría implicada en su práctica científica. Las reacciones no se hicieron esperar, bien fuera impugnando la forma de indeterminismo que involucra el argumento por resultar físicamente irrelevante, bien fuera suscribiendo directamente el relacionismo o, alternativamente, modificando la forma de entender el substantivalismo en la TGR.

Recuperados de las secuelas del agujero reabierto por **Earman y Norton** (1987) la mayoría de filósofos del espaciotiempo han optado por la última alternativa. A esta se le conoce con el nombre de substantivalismo sofisticado (SS) (**Mundy** 1992, **Brighouse** 1994, **Di Salle** 1994, **Hofer** 1996, **Bartels** 1996, **Pooley** 2002). En este tipo de doctrina ontológica se argumenta que la mejor forma de entender el espaciotiempo es suscribiendo una interpretación realista del mismo, pero que es erróneo juzgar a la variedad despojada de estructuras adicionales como si se tratase de un espaciotiempo en toda regla. Estas estructuras adicionales están codificadas en la métrica del espaciotiempo (el campo gravitacional). Es por esto que el substantivista sofisticado considera a la dupla variedad+métrica  $(M, g)$  como la forma correcta de entender el espaciotiempo. Para superar las dificultades generadas por el argumento del agujero el sustantivista sofisticado suscribe el principio relacional de la identidad de los indiscernibles en su versión moderna, conocida como equivalencia de Leibniz (EL). De este substantivalismo han quedado importantes lecciones relacionales que serán argumentadas más adelante.

En todo caso, la tensión del debate R-S sigue latente a pesar de que alguna de las reacciones más escépticas considera que el debate en el contexto actual está gastado (**Rynasiewicz** 1996). La razón para ello es que, presumiblemente, las categorías que le dieron vida en los tiempos de Newton y Leibniz se proyectan indistintamente en la física actual. Mi opinión es contraria. La cuestión sobre la mejor -la correcta- interpretación de la TGR es filosóficamente relevante, por una parte y, por otra, conduce a importantes consideraciones físicas (**Belot** 1996, **Hofer** 1998, **Belot e Earman** 2001, **Butterfeld e Isham** 1999, **Callender y Hugget** 2001).

En los tiempos de Descartes, Newton, Leibniz y Huygens se discutían los problemas fundacionales de la

<sup>2</sup>Hoy buena parte de los argumentos generales de **Reichenbach**, a pesar de su incuestionable estatura intelectual, son considerados como desacertados. Véase **Earman** 1989 p. 6. En este sentido el trabajo de **Friedman** (1983) y el del propio **Earman** con la herramienta de la geometría diferencial ha contribuido enormemente a una mejor comprensión de aspectos interpretativos y fundacionales de la TGR y de la filosofía del espaciotiempo.

mecánica. Se estaba pintando la imagen unitaria del mundo mediante la estructuración de una posible teoría física. Cuando esta teoría se estableció en la forma de la dinámica de Newton, algunos de sus problemas interpretativos no desaparecieron, pero la confianza en su poder pudo disipar la discusión filosófica por parecer físicamente intrascendente. Hoy, tres siglos después, el regreso a este tipo de filosofía de la naturaleza viene por cuenta de esa nueva búsqueda de la imagen unitaria del mundo, esto es, de la búsqueda de una teoría de unificación de todas las fuerzas (TU) o, alternativamente, de una teoría de gravitación cuántica (GQ). En este contexto muchos de los principales investigadores ven el debate como un instrumento importante para su trabajo (Smolin 1991, Rovelli 1996, Ashtekar 1998, Baez 2001, Barbour 1993, 2002). Pensar que el debate ha caducado conduce al error de suponer que la TGR es una teoría definitiva sin problemas interpretativos, pero también es el resultado de ignorar algunos adelantos hacia una mejor comprensión de la estructuras espaciotemporales de la dinámica pre-relativista (e.g. Barbour y Bertotti 1982).

Se ha mencionado insistentemente el argumento del agujero y aunque este es conocido empezaré por ofrecer una sucinta reconstrucción del mismo. Para esto utilizaré el lenguaje más económico de la geometría diferencial, en detrimento de la enunciación original hecha por Einstein en 1913 en lenguaje de coordenadas. Entre otras razones porque la enunciación del argumento en la presentación original del lenguaje de coordenadas se convirtió en una de las mayores fuentes de confusión para el propio Einstein. Tras presentar el argumento del agujero podré perfilar con mayor claridad mi posición en todo este asunto.

## 2. El argumento del agujero

En 1913, con ayuda la ayuda del matemático Marcel Grossman, Einstein publicó su primera teoría de gravitación tensorial. Esta teoría -conocida como la teoría *Entwurf*- postulaba ya un tensor métrico asociado mediante ecuaciones de campo a la distribución de materia-energía del universo. Pero a diferencia de la siguiente TGR ésta no era completamente covariante. Y aunque Einstein, en principio, estaba buscando una teoría de campo completamente covariante ya que estaba convencido de que la covarianza general era garantía teórica de un principio formal de relatividad general, llegó a convencerse durante un par de años (1913-1915)

de que la limitada covarianza de su teoría preliminar era una necesidad de orden relacional. En otras palabras, Einstein estaba convencido de que una teoría de gravitación covariante violaba la ley de la causalidad. Esto porque, según su interpretación de este tipo de ecuaciones de campo, una distribución de materia dada no definía unívocamente las componentes del tensor métrico y por tanto, la estructura inercial del espaciotiempo no quedaba formalmente determinada por la materia. Ello implicaba una violación de lo que después se conocería como el principio de Mach (Einstein 1918). La historia del calvario de Einstein para recuperar la covarianza general de sus ecuaciones de campo es compleja y muy sutil, pero no hay duda de que la principal objeción de Einstein a la covarianza general de la teoría estaba motivada por su determinación de edificar una teoría relacional al estilo anticipado por Mach. Tampoco hay duda de que esta objeción estaba soportada por el ya célebre argumento del agujero. El argumento del agujero fue concebido por Einstein en 1913, pero -como ya había mencionado- fue redescubierto por Earman y Norton en 1987. A continuación ofrezco una breve reconstrucción del agujero en una versión más cercana a la de Earman y Norton por considerar que su presentación en el lenguaje de la geometría diferencial resulta más limpia que la enunciación original en lenguaje de coordenadas. (¡Tomó casi dos años a Einstein superar la dificultades interpretativas para salir de su propio agujero!). Veamos<sup>3</sup>:

Cualquier modelo de la TGR (i.e., una solución a las ecuaciones de campo), que representa un universo posible, es usualmente representado por la triplete  $\langle M, g, T \rangle$ . Donde  $M$  es una variedad de puntos diferenciable con una cierta estructura topológica,  $g$  es el tensor métrico que codifica gravedad, estructura inercial y geometría, y  $T$  es el tensor de energía-momento que representa la distribución de materia-energía del universo posible.

La covarianza general de la TGR -y de cualquier teoría similar- implica, por definición, que si cualquier tensor  $X$  de la variedad es una solución a las ecuaciones de campo, también lo es el tensor  $\phi * X$  que resulta de empujar  $X$  mediante la acción de un difeomorfismo activo. En este caso  $X$  es cualquier tensor métrico o material que pueda definirse sobre la variedad. Un difeomorfismo activo es esencialmente una transformación de coordenadas que lleva tensores de sus puntos de origen a otros alterando de paso la forma del tensor. Es importante distinguirlos de los difeomorfismos pasivos

<sup>3</sup>Salvo algunas modificaciones menores, reproduzco *verbatim* el argumento del agujero del apéndice de Cala et al. 2007

que actúan localmente como transformaciones de coordenadas que simplemente rebautizan los puntos de la variedad sin generar *movimientos* ni *deformaciones*. Este tipo de transformaciones pasivas resultan triviales para nuestra discusión ya que cualquier teoría puede hacerse covariante general pasiva simplemente requiriendo que sus ecuaciones de campo sean escritas en forma tensorial (Kretschmann 1917, Friedman 1983). A cambio, un difeomorfismo activo  $\phi : M \rightarrow M$  lleva un punto  $p$  de  $M$  a otro punto  $q := \phi(p)$  en  $M$ , moviendo o deformando los 'contenidos' de la variedad.

El argumento del agujero es posible debido a la libertad para generar modelos de la TGR mediante la acción de este tipo de difeomorfismos activos. El conjunto de estos difeomorfismos forma un grupo denotado habitualmente como  $Diff(M)$ . Con esto en mente enuncio el argumento del agujero de Earman y Norton en forma compacta.

Sea  $U = \langle M, g, T \rangle$  un modelo de la TGR. Por definición, es posible escoger cualquier difeomorfismo  $\phi \in Diff(M)$  para generar un nuevo modelo  $U^* = \langle M, \phi * g, \phi * T \rangle$  de la TGR. Se escoje  $\phi * = id$  (transformación identidad) en toda la variedad  $M$  exceptuando una región  $H \subset M$  dentro de la cual  $\phi$  difiere suavemente de la identidad. Esta región  $H$  es el *agujero* de Einstein. Dentro de éste  $\phi * \neq id$ . Por conveniencia suponemos que el espaciotiempo  $M$  admite una foliación (3+1) mediante rebanadas (hipersuperficies) globales de tipo espacial (spacelike). Es decir, suponemos que podemos partir el espaciotiempo en tajadas espaciales tabuladas por un parámetro temporal  $t$  que aumenta en la dirección futura a medida que nos desplazamos a lo largo de una curva tipo-tiempo (timelike). Ahora escojemos  $H \subset M$  para  $t > 0$ .

De todo esto resulta que, como  $\phi * = id$  para  $t \leq 0$ , pero difiere suavemente para  $t > 0$  (i.e dentro de  $H \subset M$ ), tenemos dos modelos de la teoría que difieren a partir de  $t = 0$ . Esto es,  $U = \langle M, g, T \rangle$  y  $U^* = \langle M, \phi * g, \phi * T \rangle$  son idénticos hasta  $t = 0$  pero difieren a partir de entonces<sup>4</sup>. Y esto debería entenderse como una violación del determinismo en la TGR ya que la especificación completa del espaciotiempo y sus contenidos materiales ( $g, T$ ) fuera del agujero no determina unívocamente la forma en que éstos evolucionan (o se

distribuyen) dentro de los puntos del agujero. En nuestro caso, con un agujero puesto en el futuro, según la teoría, el futuro no vendría determinado unívocamente por esta especificación completa del pasado. Falla el determinismo.

Pero aquí es importante advertir la forma en que falla el determinismo. Por ejemplo, si el centro de una galaxia  $\chi$  se encuentra ubicado hoy en el punto  $p$ , las ecuaciones de campo más el pasado no podrían determinar si mañana éste pasa por el punto  $q$  de  $M$  o por el punto  $r$  de  $M$ . Lo chocante del argumento no es que el determinismo falle, al fin y al cabo, el determinismo no tiene necesariamente que ser una camisa de fuerza de nuestras teorías. Ya tenemos a la mecánica cuántica en su interpretación estándar. Lo chocante proviene de la manera en que falla. El indeterminismo del agujero proviene de la imposibilidad para saber qué punto específico de la variedad subyace a qué proceso material concreto.

Las ecuaciones de campo no pueden escoger entre diferentes evoluciones de los campos dentro del agujero. En otras palabras, no pueden seleccionar a  $U = \langle M, g, T \rangle$  sobre  $U^* = \langle M, \phi * g, \phi * T \rangle$  para determinar si, por ejemplo, el centro de la galaxia  $\chi$  pasará por  $q$  de  $M$  o por  $r$  de  $M$ . Pero, el asunto importante es que los modelos  $U$  y  $U^*$  de la TGR son empíricamente indistinguibles. Comparten la misma variedad espaciotemporal de puntos subyacentes pero discrepan, dentro del *hueco*, sobre la forma en que los campos y la materia son distribuidos sin que esto suponga ningún tipo de diferencia observacional.

Todos los invariantes físicos de la teoría son preservados ante el tipo de transformaciones que generan el indeterminismo en el agujero. En tales circunstancias un realista ingenuo, al hacer una lectura literal de la variedad como una entidad física real cuyos puntos existen objetivamente y forman el tejido sustancial del espaciotiempo, enfrenta la siguiente traba interpretativa: Si la variedad  $M$  es considerada como un espacio físico real en toda regla, esto es, como una entidad capaz de existencia concreta con independencia de la ocurrencia de procesos materiales, entonces él debería considerar a  $U$  y  $U^*$  como modelos físicamente, ontológicamente, distintos aunque estos sean empíricamente equivalentes. Esto claramente recuerda el argumento de los mundos desplazados de Leibniz, donde un universo probable  $U_I$

<sup>4</sup>En la versión original de Einstein  $H$  no estaba, necesariamente, en el futuro. Pero fuera de  $H$  se suponía que el universo estaba lleno de materia ( $T \neq 0$ ), mientras que en su interior no había materia ( $T = 0$ ). Por esto recibió la denominación original de 'agujero'. Era un hueco vacío. El difeomorfismo activo generado por Einstein parecía violar 'la ley de la causalidad' ya que la materia fuera del hueco no determinaba unívocamente la estructura métrica ni inercial dentro de éste. Esto, de paso, parecía una violación flagrante del principio Mach o de la *condicionalidad material del espacio*, como Einstein le llamaba por entonces.

resultaba empíricamente indistinguible de un universo probable  $U_s$ , al conservar el conjunto de relaciones entre objetos materiales coexistentes, pero difería de éste por su ubicación en el espacio absoluto. El Newtoniano estaba obligado a conceder, dada la identidad presupuesta para los puntos del espacio, que los dos casos correspondían a situaciones ontológicamente diferentes. En su lugar Leibniz apelaba a la identidad de los indiscernibles (PII) para concluir que se trataba de dos representaciones de un mismo universo o dicho de otro modo de dos maneras de nombrar la misma cosa (Cala 2006.). En la terminología y contexto actuales la identidad de los indiscernibles recibe el nombre de *Equivalencia de Leibniz*. Este es un principio de inspiración relacional y puede enunciarse así:

Equivalencia de Leibniz (EL): Dos distribuciones de campos relacionadas por un difeomorfismo activo representan la misma situación física, esto es,  $U = \langle M, g, T \rangle$  y  $U^* = \langle M, \phi * g, \phi * T \rangle$  son equivalentes para cualquier  $\phi \in Diff(M)$ .

En resumen, según Earman y Norton, el substantivista (realista ingenuo) debe rechazar la EL y concluir extrañamente que la TGR es una teoría indeterminista. Por supuesto que las leyes de la física pueden admitir el indeterminismo, bien sea porque la teoría sea intrínsecamente probabilista, bien sea por la presencia de singularidades, o por la incursión de *invasores espaciales* (Earman 1989 Cáp. 3). Pero todas estas parecen aceptables, o buenas, razones físicas. La cuestión es que el determinismo debería fallar por buenas razones de la física y no por compromisos con alguna doctrina ontológica que de entrada lo proscriba. En palabras de Earman, 'al determinismo debería dársele una oportunidad' (Earman 1989 p.180).

Los filósofos han visto diversas reacciones al argumento del agujero, pero la mayoría concuerdan con Earman y Norton en que el determinismo merece una oportunidad en la interpretación de la TGR. Al fin y al cabo, esta es la forma habitual de concebir la teoría en la práctica científica. Estoy de acuerdo. Aquí se trata de un indeterminismo que no afecta la determinación predictiva empírica de la teoría. Esto es raro. Por esto la mayoría suscribe la EL y rechaza el substantivalismo directo que sostiene el argumento del agujero. No es de extrañar que la conclusión es la misma a la que Einstein llegó escapando del agujero, esto es, que los puntos de la variedad no tienen significado ontológico independiente, es decir, que presuponer la identidad primitiva de los puntos de la variedad lleva al tipo de indeterminación

'ingenua' que a él le hizo caer en el enredo del agujero desde el principio. Cuando Einstein se dió cuenta de esto pudo, por fin, formular sus ecuaciones de campo gravitacional completamente covariantes entendiéndolas como ecuaciones de campo deterministas.

En cualquier caso, esta es ciertamente la concepción ampliamente mayoritaria entre filósofos del espacio-tiempo y cosmólogos activos. En su famoso tratado sobre la estructura del universo a gran escala, Hawking y Ellis (1973) simplemente se refieren a todos los modelos isomorfos de la TGR relacionados mediante  $Diff(M)$  como una clase equivalente que representa la misma solución de las ecuaciones de campo (i.e. un único universo posible) sin ninguna mención al argumento del agujero. La presentación de Wald (1984) es similar.

La presunción tácita de la EL, común a prácticamente todas las representaciones de la TGR, prohíbe pues la individuación apriorística de los puntos de la variedad. Para eleverlos a la categoría de eventos se requiere, como Einstein declaraba, la ocurrencia de coincidencias espaciotemporales y estas no pueden señalarse sin la presencia de algún campo físico definido sobre la misma. Pero aunque el rechazo generalizado a la identidad primitiva de los puntos del espaciotiempo -vía EL- pueda sonar muy relacional, la posición más consensuada se ha decantado por una interpretación substantivista de la TGR en la forma ya mencionada del substantivalismo sofisticado. La evidente tensión proviene, primero, de las diversas formas de definir el substantivalismo, y luego de los detalles interpretativos de estas definiciones. Por ahora, del argumento del agujero retengo el siguiente corolario: *En la TGR los puntos de la variedad no tienen identidad primitiva.*

A continuación argumentaré que esto, en parte, conduce mejor a una interpretación relacional de la TGR.

### 3. Sobre la mejor forma de plantear el debate cuando los puntos del espaciotiempo son inidentificables *per se*

El argumento del agujero está montado, se ha visto, sobre la suposición de que el substantivalismo es una doctrina realista sobre los puntos del espaciotiempo y que éstos constituyen el tejido del soporte universal de los procesos materiales y en general de los fenómenos. Por el contrario, el relacionismo debería refutar este estatus ontológico para el soporte universal de todos los fenómenos. Recientemente John Earman y Gordon

**Belot** han insistido en esta forma de plantear el debate R-S. Ellos escriben (**Belot y Earman** 2001, p 227):

*Substantivalists understand the existence of spacetime in terms of the existence of its pointlike parts, and gloss spatiotemporal relations between material contents in terms of the spatiotemporal relations between points at which they occur. Relationists will deny that spacetime points enjoy this robust sort of existence, and will accept spatiotemporal relations between events as primitive.*

En discusiones recientes es bien cierto que por momentos una distinción clara entre los participantes de cada costado del debate R-S puede resultar cuando menos desconcertante. La distinción que hacen **Earman y Belot** resulta interesante por cuanto parece estar, en principio, atada estrechamente a las premisas del debate original, cuando **Newton y Leibniz**, presumiblemente, podían 'darse el lujo de saber de que estaban hablando'<sup>5</sup>. Puntos o Materia. Contenedor o contenido. Esta forma de hablar hace parecer el debate una mera discusión sobre la aceptación de la EL (relacionismo) o su rechazo (substantivalismo).

Mi impresión es que la EL, o el rechazo a la identidad robusta o primitiva de los puntos del espaciotiempo, es una premisa necesaria aunque no suficiente para cualquier forma de relacionismo. Por su parte el substantivalismo es neutro en este asunto. Esto debe quedar claro al pasar de la representación convencional newtoniana de la dinámica clásica a su representación en el espaciotiempo neo-newtoniano. En esta última los puntos son despojados de su identidad, al remover el espacio absoluto, y el énfasis del sustancialismo está puesto en la existencia robusta de las estructuras espaciotemporales. Estas estructuras son independientes de la presencia de

materia y hacen inteligible la idea de un cuerpo único moviéndose en el espacio sin relación a nada (material)<sup>6</sup>.

De todas formas **Earman y Belot** trazan su distinción argumentando que en el contexto de las probables teorías de campo unificado (TU) o, alternativamente, de gravitación cuántica (GQ) debe aparecer esta separación limpia en el debate. Concuerdo en que la eventual formulación de una teoría en la que los puntos del espaciotiempo estuviesen cargados con el tipo de existencia robusta de la que hablan **Earman y Belot**, haría del substantivalismo una doctrina mucho más irrefutable, pero que yo sepa no existen teorías de este tipo asomando por el horizonte teórico actual. Por esto considero que es más saludable presentar al substantivalismo como una doctrina realista sobre la existencia independiente de estructuras espaciotemporales.

En esta línea, esta es la definición enunciada por **Hoefer** (1996, p. 5):

*A modern-day substantivalist thinks that spacetime is a kind of thing which can, in consistency with the laws of nature, exist independently of material things (ordinary matter, light, and so on) and which is properly described as having its own properties, over and above the properties of any material things that may occupy parts of it.*

Estoy de acuerdo en la definición general. Pero discrepo en los detalles importantes. Especialmente en la clasificación de las 'cosas materiales'<sup>7</sup>. **Hoefer** hace su definición hablando como un substantivalista sofisticado. Ya he dicho que el substantivalismo sofisticado (SS) ha sido considerado mayoritariamente como la mejor forma de entender el espaciotiempo y como la reacción más natural al argumento del agujero (**Mundy** 1992, **Brighouse** 1994, **Di Salle** 1994, **Hoefer** 1996, **Bartels**

<sup>5</sup>La frase citada es original de **Earman** (1989, p 18). También es citada por **Rynasiewicz** (1996, p. 286) y **Hoefer** (1998, p. 452).

<sup>6</sup>En la representación neo-newtoniana (El término es de **Sklar** 1976) de la mecánica clásica se remueve el espacio absoluto, es decir, se suprime la idea de que exista un marco de referencia universal privilegiado. Dicho de otro modo, se suprime la noción de reposo absoluto y retenemos la clase o familia equivalente de sistemas inerciales conectados por las simetrías del grupo de Galileo. Al espaciotiempo neo-newtoniano, por esta razón, también se le conoce como el espaciotiempo galileano

<sup>7</sup>No obstante, existen voces discordantes que vuelven a darle la vuelta al asunto. Por ejemplo **Saunders** (2002), sostiene que el relacionismo (no reductivo) es neutro en la distinción entre materia y espacio. Él está interesado en los principios relacionales de Leibniz (Principio de Razón Suficiente y PII) y su proyección en la forma de principios de simetría e invarianza en las teorías de campo (**Saunders** 2003). Considerando que la covarianza general activa de la TGR funciona como un principio de invariancia ante cualquier transformación del grupo  $Diff(M)$ , la EL parece -según el- suficiente para hacer de la TGR una teoría relacional, sin que esto implique una referencia explícita a la distinción entre materia y espacio. En este caso lo importante es que los invariantes de la teoría corresponden a especificaciones físicas relacionales, es decir, que no precisan puntos de referencia predeterminados. **Teller** (1991) argumenta en esta misma línea. Considero, al contrario, que la clave de la discusión está en la correcta distinción entre materia y espacio.



1996, Pooley 2002). Pero, ¿Qué es el substantivalismo sofisticado?

El substantivalista sofisticado es alguien que suscribe la EL, es realista sobre la existencia independiente del espaciotiempo pero no asigna el estatus ontológico de espaciotiempo completo a la variedad desnuda. Una de las razones, aparte del argumento del agujero, es que la variedad funciona como una colección de puntos con estructura diferenciable y topológica pero carece prácticamente de todas las propiedades *paradigmáticas* que permiten referirse a ésta como si se tratara de un espaciotiempo en toda regla.

Por supuesto, para encontrar las propiedades paradigmáticas del espaciotiempo habría que volver la mirada hacia la dinámica de Newton. Y es que consideramos el espacio absoluto newtoniano como una entidad real en toda regla porque éste tenía todas las estructuras que hacían teóricamente inteligible la idea de un cuerpo único en movimiento sin relación a nada (material). Y la variedad por sí sola no permite ni siquiera definir distancias espaciales ni temporales. No contiene la estructura inercial o conexión afín y tampoco permite distinguir pasado de futuro. En definitiva, la variedad dista mucho de cumplir el papel paradigmático que cumplían el espacio y el tiempo newtonianos o, en su defecto, el espaciotiempo neo-newtoniano.

Creo que esta razón es bastante fuerte. La variedad es una entidad abstracta no exclusiva de la TGR y sin cargarla con estructuras adicionales está lejos de cumplir el rol explicativo que cumplía el espacio en la dinámica de Newton. Estas estructuras adicionales son básicamente estructuras métricas. La variedad carece de la estructura métrica necesaria para hablar, de alguna forma, de un espaciotiempo inteligible. Resultaría más que paradójico considerarla como un espaciotiempo sin estructuras espaciotemporales. Por esto, en esencia, para el substantivalista sofisticado es más natural hablar de la dupla métrica+variedad  $(M, g)$  para referirse a un espaciotiempo físico real en toda regla<sup>8</sup>. El substantivalista sofisticado está convencido de que en la TGR, el rol explicativo que cumplía el espacio newtoniano es proporcionado por el tensor métrico  $(g)$ .

A mi juicio, el SS hace bien al señalar las debilidades de la variedad para ser considerada como un espaciotiempo en toda regla. Empero, resulta poco convincente al asignarle a la métrica el estatus de estructura

substantivalista. Al hacerlo, el substantivalista sofisticado está tomando todas las propiedades de la métrica como propiedades intrínsecas de un espaciotiempo real. La fuerza de esta línea argumental, vimos, depende de la clasificación de las estructuras espaciotemporales heredadas de la dinámica de Newton. Considero que esto no es correcto. Pero incluso si juzgamos a la métrica desde la perspectiva newtoniana las cosas no quedan muy claras. Veamos por qué.

El campo métrico de la TGR tiene energía y momento. Resulta más natural pensar que la energía y el momento son cargados por campos físicos materiales como el campo electromagnético o cualquier campo de distribuciones de densidades en un fluido, por ejemplo. ¿Por qué elevar, entonces, la métrica a la categoría de espaciotiempo real independiente sin más? ¿Dónde ponemos el campo gravitacional? ¿En la materia como todos los demás campos físicos o en las propiedades del espacio? ¿Qué pasa con las ondas gravitacionales y la energía contenida en campos gravitacionales sin fuentes? **Stachel** se expresa así en todo este asunto (Stachel 1993, p.144):

*Several philosophers of science have argued that the general theory of relativity actually supports spacetime substantivalism (if not separate spatial and temporal substantivalisms) since it allows solutions consisting of nothing but a differentiable manifold with a metric tensor field and no other fields present (empty spacetimes). This claim, however ignores the second role of the metric tensor field; if it is there chronogeometrically, it inescapably generates all the gravitational field structures. Perhaps the culprit here is the words 'empty spacetime'. An empty spacetime could also be called a pure gravitational field, and it seems to me that the gravitational field is just as real a physical field as any other. To ignore its reality in the philosophy of spacetime is just as perilous as to ignore it in everyday life.*

Estoy de acuerdo con **Stachel** en que es mejor considerar al campo métrico como un campo físico material pero no sólo porque integre las estructuras del campo gravitacional. En breve volveré sobre esto.

<sup>8</sup>Dado que el SS suscribe la EL sería más preciso referirse a la dupla  $(M, \{g\})$  como un espaciotiempo probable en toda regla. Aquí  $\{g\}$  es una clase equivalente de métricas relacionadas entre sí mediante cualquier  $\phi \in Diff(M)$ .

La TGR incorpora esencialmente, geometría, gravedad e inercia en la forma del campo métrico. En la física de Newton, geometría e inercia son cualidades estructurales del espacio, mientras que el campo gravitacional es un campo físico. El SS escoge geometría e inercia -o las estructuras cronogeométricas- mientras que los pocos relacionistas como **Stachel**, **Rovelli** y otros escogen el campo gravitacional para enfatizar sus respectivas posiciones. Esto es lo que dice **Rovelli** al respecto (**Rovelli** 1997, p. 193):

*Einstein's identification between gravitational field and geometry can be read in two alternative ways:*

*i. as the discovery that the gravitational field is nothing but a local distortion of spacetime geometry; or*

*ii. as the discovery that spacetime geometry is nothing but a manifestation of a particular field, the gravitational field.*

*The choice between these two points of view is a matter of taste, at least as long as we remain within the realm of nonquantistic and nonthermal general relativity. I believe, however, that the first view, which is perhaps more traditional, tends to obscure, rather than enlighten, the profound shift in the view of spacetime produced by general relativity*

...

Encuentro convincente la interpretación relacional (ii), pero a estas alturas uno puede imaginarse por qué **Rynasiewicz** (1996) argumenta que el debate ha caducado, o por qué **Saunders** (2002) intenta definir un relacionismo neutro en cuanto a la distinción entre materia y espacio. Creo que a pesar de las dificultades rendirse no es un camino acertado y tampoco lo es ignorar la distinción entre materia y espacio. Este es el vértice de la cuestión.

Recordemos que la Teoría Especial de la Relatividad (TER) tiene básicamente las mismas estructuras -geometría e inercia- que la dinámica de Newton incorporadas a las cualidades del espacio<sup>9</sup>. En este sentido perpetúa la tradición newtoniana. En la TGR las cosas son distintas. El desencanto de **Rynasiewicz** y **Saunders** es comprensible porque, al ser usualmente juzgada desde la tradición newtoniana, la estructura teórica y el papel explicativo del tensor métrico en la TGR no

parece permitir una distinción clara para decantar el debate. 'Parece una cuestión de gusto'. La razón, creo, para haber convertido a la interpretación substantivalista en la más tradicional es, tautológicamente, la fuerza de la tradición.

Quiero insistir en lo siguiente: La dinámica Newtoniana, paradigmática de nuestras ideas sobre la materia y el espacio, es entendida como una teoría substantivalista sobre el espacio (y el tiempo). No es de extrañar que mayoritariamente físicos, cosmólogos y astrofísicos, hayan tomado a la TGR, siguiendo la usanza newtoniana, como una teoría substantivalista sobre el espacio-tiempo. La mayoría de filósofos de la ciencia también han suscrito esta interpretación pero, ante las dificultades presentadas por la ambigüedad en la lectura de la TGR, deben existir mejores argumentos que la tradición.

Es bien cierto que **Newton** tenía una teoría completa y **Leibniz** no. Pero liquidar al relacionismo amparándose en la victoria de **Newton** es, a mi juicio, puro atavismo gratuito. Podemos superar esto. Yo propongo el siguiente ejercicio: ¿Qué tal si tomamos por buenas algunas de las premisas relacionales de **Leibniz** (o **Mach**)? En este caso, la métrica -el nudo del asunto- ¿qué papel explicativo cumpliría? ¿Estaría bien planteada la elección entre geometría (i.) y campo gravitacional (ii.) planteada por **Rovelli** (y compartida prácticamente por todos los participantes del debate R-S en la TGR)? ¿Sería la geometría entendida como una cualidad intrínseca de un espacio real independiente de la materia?

Veamos: Para **Leibniz** el espacio no es otra cosa que el conjunto de relaciones entre objetos materiales coexistentes. En este caso, la geometría debe funcionar como una estructura que codifica el conjunto de relaciones métricas entre objetos materiales coexistentes. Pensemos que **Leibniz** tuvo una teoría buena. ¿Sería sano concluir que la geometría *per se* es una entidad relacional pura y por tanto la TGR es mejor entendida como una teoría relacional? Estoy casi seguro de que todo el mundo respondería negativamente a esto. Sin embargo, muchos filósofos encuentran muy natural hacer lo propio con la geometría para argumentar una interpretación substantivalista de la TGR. En realidad la geometría, sin más, parece neutra en este asunto. Forma parte de las estructuras que sirven al relacionista para codificar relaciones entre objetos materiales o al substantivalista para

<sup>9</sup>Igualmente, es posible pensar que el campo gravitacional funciona como un campo físico independiente. Aunque por razones estructurales de fondo (localidad) la dificultad para incorporarlo a la teoría motivó la gestación de la TGR

describir al espacio o al espaciotiempo. En este grupo también cabe la estructura diferencial y topológica de la variedad o inclusive toda la estructura inercial. Utilizar *per se* el papel geométrico, o métrico, o cronogeométrico, del campo gravitacional de la TGR como un argumento decisivo en favor de la interpretación substantivalista se cae, desde esta perspectiva, por su propio peso.

La fragilidad de la interpretación substantivalista queda en evidencia. Por su parte el relacionalista tiene razones importantes para considerar que el campo métrico es un campo material (energía, momento, campo gravitacional). Parece que la interpretación substantivalista se hubiera olvidado del asunto de fondo: la naturaleza *independiente* de las estructuras espaciotemporales que cumplen un cierto papel explicativo en la dinámica. Para ilustrarlo, propongo el siguiente ejercicio: Imaginemos que N y L discuten sobre si el rojo es una propiedad del espacio o el resultado de relaciones materiales. N y L logran construir buenas teorías en las cuales, por una parte, el rojo aparece como una cualidad del espacio y, por otra, como una entidad relacional (i.e. dependiente de la materia). N y L están de acuerdo sobre las propiedades esenciales de la materia y su papel dinámico y, en consecuencia, entienden el campo gravitacional como un objeto material igual que los demás campos. Por alguna razón la teoría de L se pierde durante 200 años. Nos acostumbramos a pensar, con N, que el rojo es una propiedad del espacio; de hecho que caracteriza un espacio independiente de la materia. Pero la teoría de N es mejorada por E. En la teoría de E, el campo gravitacional, un objeto dinámico como todos los demás campos físicos, también resulta siendo rojo. Los seguidores de N, la gran mayoría ya que L cayó en el olvido, se encontrarán ante un dilema espeluznante. Interpretan al campo gravitacional como un espaciotiempo real en toda regla únicamente porque es rojo o lo interpretan como un campo material por las razones físicas conocidas. Parece una elección arbitraria.

De todas formas la mayoría se decanta por el rojo porque al parecer este ha calado como la cualidad esencial para definir un espacio independiente de los objetos materiales. Pero su estatus de cualidad esencial (del espacio o la materia) era precisamente lo que discutían N y L desde el principio. Si rescatamos la teoría de L y la ponemos a la par con la de N, el asunto cambia. En este caso si los seguidores de N no ignoran a la teoría de L, concluirán que el rojo en realidad es neutro en este asunto, que no es una razón convincente para dejar de

considerar al campo gravitacional como un campo físico de materia al igual que los demás campos. Ya sabíamos con L, desde el principio, que la materia podía codificar al rojo dentro de sus cualidades estructurales. El rojo *per se* no prueba nada contra la materia. Éste era el objeto de discusión. No puede funcionar en sí mismo como una justificación valedera. La cuestión aparecerá, en cambio, ante los ojos de los seguidores de L como un asunto resuelto. L tiene buenas razones para entender el campo gravitacional como un campo de materia; son las mismas razones que compartía con N desde el principio (energía, momento, estructura de campo físico, etc...) y, superada la teoría de N, el rojo ha dejado de lucir como una cualidad intrínseca de un espacio físico real independiente de la presencia de materia. El relacionismo no afirma que el espaciotiempo no exista, tan sólo supedita su estatus ontológico a las propiedades estructurales de la materia. No hay espaciotiempo sin materia según esta doctrina ontológica. Con este ejemplo inocente sólo quiero enfatizar que una vez que estructuras espaciotemporales como la inercia y la geometría también puedan recibir un tratamiento relacional, parecerá mucho más natural considerar un campo que integra dichas estructuras como un campo físico ya que dichas estructuras no pasarían a definir necesaria o intrínsecamente a un espaciotiempo independiente.

El relacionismo ha sido proscrito por la evidencia histórica de que ni **Leibniz**, ni **Mach** construyeron una dinámica relacional capaz de rivalizar con la dinámica de Newton. Pero aún así, superada la dinámica newtoniana, la doctrina merece una oportunidad. Que se haya descartado en el contexto de la TGR por razones que en el fondo están dictaminadas por la contingencia histórica resulta ahora entendible pero no justificable.

He argumentado que, en buena medida, la interpretación substantivalista (SS) de la TGR debe su popularidad a la carga atávica de la dinámica de Newton. Con el fin de dar una oportunidad equitativa al relacionismo y limpiar parte de la inercia histórica de toda esta discusión, propuse el ejercicio de imaginar que Leibniz, o un seguidor suyo o cualquier Leibniziano, tenía una teoría relacional buena, a la par con la de Newton. Pues bien, este no tiene que ser tan sólo un ejercicio de pura imaginación ya que, a mi juicio las ideas de **Leibniz** y **Mach**, en el contexto de la dinámica clásica, han encontrado buena forma en la teoría relacional desarrollada inicialmente por **Barbour** y **Bertotti** (BB2,1982)<sup>10</sup>. En consecuencia, la condena histórica del relacionismo

<sup>10</sup>La teoría de Barbour se conoce como la dinámica intrínseca. Los elementos principales de la formulación intrínseca de la dinámica son las configuraciones materiales instantáneas *tres-dimensionales* y la *acción* que permite escoger -vía principio de Jacobi- la historia

puede ser subsanada. No es este el lugar para mostrar que **Barbour** y **Bertotti**, efectivamente, han logrado construir una dinámica clásica genuinamente relacional y que además ésta es mejor, por ser más explicativa, que la dinámica convencional substantivalista newtoniana (para esto véase directamente **Barbour** y **Bertotti** 1982 (BB2) o alternativamente **Brown** y **Pooley** 2001). De todas formas, de ser así creo que, como he intentado argumentar, la interpretación de la TGR y en particular el papel desempeñado por el campo gravitacional reciben su lectura más natural en la línea relacional.

Mi impresión es que en este caso, toda vez que sabemos que las estructuras espaciotemporales -como la geometría y la estructura inercial- reciben una interpretación relacional consistente, la obligación explicativa se invierte en el debate R-L en la TGR. No respondería al relacionista mostrar por qué el campo gravitacional no funciona como un espaciotiempo independiente ya que éste cumpliría funciones, o tendría propiedades, representativas de estructuras genuinamente relacionales; así que la deuda explicativa quedaría pendiente, más bien, para el costado substantivalista que necesitaría argumentos más fuertes para elevar el campo gravitacional a la categoría de entidad espaciotemporal independiente y mostrar por qué no puede ser entendido como una entidad relacional material.

En la TGR las variables físicas, bien sea la ubicación de una partícula material, la intensidad de un campo en algún lugar, o la trayectoria de un rayo de luz, tienen que especificarse relacionamente asumiendo la EL, es decir, tomando los invariantes físicos de la clase equivalente  $\{g\}$ . En los tiempos de Leibniz la identidad de los indiscernibles (PII), precursora natural de la EL, aparecía como un principio relacional fuera de toda duda. Similarmente, la geometría aparece en la física de Newton como una propiedad substantivalista difícil de objetar. He admitido que la EL *per se* es neutra en el debate, e insisto, la geometría y las estructuras cronogeométricas *per se* también lo son. Lo que está en juego es su naturaleza independiente.

De la misma forma en que los substantivalistas han respondido al argumento del agujero reconociendo hábilmente que la EL no es una razón fuerte contra el substantivalismo, debían reconocer que por sí solas las estructuras espaciotemporales de la métrica tampoco pueden decantar en forma alguna el debate hacia su

costado. Éstas (y su naturaleza independiente) son el objeto de discusión. No pueden funcionar como un argumento decisivo. Mientras el relacionismo tiene buenas razones para juzgar a la métrica como un campo de materia, el substantivalismo sofisticado, a mi juicio, no tiene argumentos importantes para rechazar la naturaleza material del campo gravitacional. Este fue bien entendido como un campo físico antes del argumento del agujero. Esto debió tomarse como una buena nota de advertencia, ya que por entonces a casi nadie pareció incomodarle su estructura espaciotemporal para discriminar su naturaleza material. Si estamos preparados para vencer la inercia histórica y dar una oportunidad a **Leibniz** y **Mach** en todo esto, veremos que la TGR recibe su interpretación más natural como una teoría relacional limpia.

#### 4. La naturaleza dinámica de la materia

A continuación quiero argumentar en favor del papel dinámico de la materia. Como veremos, este aspecto importante suele ser ignorado por el substantivalismo sofisticado en su interpretación del papel de la métrica en la TGR. Las variables dinámicas de nuestras teorías están ligadas a propiedades estructurales de la materia. Esta es notablemente una característica distintiva de nuestras teorías físicas. Sin embargo, este consenso es roto por la interpretación substantivalista (SS) de la TGR.

Recordemos que un modelo de la TGR  $\langle M, g, T \rangle$  está dado por la variedad  $M$ , el campo métrico  $g$ , que funciona como un objeto dinámico que debe representar las propiedades del espaciotiempo, y  $T$  que, naturalmente, es también un objeto dinámico que representa los contenidos materiales del mismo. Hemos visto que no hay nada contradictorio en hablar de propiedades espaciotemporales relacionadas con la materia. El substantivalista quiere proscribir cualquier estructura espaciotemporal de la materia.

En este sentido el substantivalista sofisticado quiere que en su teoría los objetos materiales aparezcan separados, limpiamente, de las estructuras espaciotemporales.

Supongamos que puede hacerse tal tipo de distinción limpia entre objetos espaciotemporales  $S_i$  y objetos materiales  $m_i$ . En este caso los modelos  $\aleph$  de una buena teoría substantivalista estarán representados de la siguiente forma  $\aleph = \langle M, S_1, S_2, \dots, m_1, m_2, \dots \rangle$ .

conformada por la sucesión de tales configuraciones materiales relativas prescindiendo *ab initio* de los sistemas inerciales de la dinámica clásica en la versión newtoniana. El enfoque desarrollado por Barbour y Bertotti puede hallarse en forma germinal en **Zanstra** 1928.

Afortunadamente, como es bien sabido, esta suposición funciona bien para modelos newtonianos, neo-newtonianos, y tipo-Minkowski (TER). La separación entre materia y espacio-tiempo está bien definida en estos casos. Funciona bien si tomamos cualquier ensamble de campos físicos (electromagnéticos, gravitacionales, fluidos de polvo, etc.) inmersos en los respectivos espacios newtoniano, neo-newtoniano o tipo-Minkowski (TER). En estos casos un modelo de la teoría puede representarse así:  $\aleph = \langle M, h, \Gamma, \phi, \rho, E, \dots \rangle$ <sup>11</sup>. Donde  $M$  es la variedad,  $h$  es la estructura métrica,  $\Gamma$  es la conexión afín o estructura inercial,  $\phi$  es el campo gravitacional,  $\rho$  es una densidad de fluido que puede representar la distribución de materia ponderable convencional,  $E$  es el campo electromagnético y los puntos suspensivos corresponden a cualquier otra forma de materia que queramos incluir en el modelo.

En todos estos modelos pre-TGR,  $h$  y  $\Gamma$  son entendidos como propiedades del espacio-tiempo, mientras que  $\phi, \rho, E$  y el resto son objetos materiales. Todo el mundo desearía que las cosas fueran tan limpias cuando pasamos a los modelos de la TGR y que una simple traducción directa de estas estructuras y campos bastara para la identificación, pero allí el tensor  $g$  integra simultáneamente los roles de  $\phi$  -un campo físico de materia- y de  $h$  y  $\Gamma$  -estructuras espaciotemporales-. Así que necesitamos un criterio más fuerte que la simple identificación de estructuras. Aparte del transporte de energía-momento, común a todos los campos materiales, un criterio que encuentre concluyente viene dado por la naturaleza dinámica de estos objetos.

En los modelos pre-TGR las estructuras espaciotemporales ( $h, \Gamma$ ) son entidades absolutas que describen las propiedades del espaciotiempo. Por su parte, toda la materia está representada por objetos dinámicos ( $\phi, \rho, E, \dots$ )<sup>12</sup>. Es pertinente aclarar que un objeto absoluto -en el sentido de la geometría diferencial- es un objeto que retiene su estructura en todos los modelos de la teoría afectando la evolución dinámica de la materia sin ser recíprocamente afectado. En general los objetos absolutos son caracterizados por su grupo de simetría y el efecto de las correspondientes transformaciones de simetría es producir movimientos o arrastre de los campos dinámicos mientras el fondo absoluto permanece invariante<sup>13</sup>.

En todos los modelos (pre-TGR) del tipo  $\aleph = \langle M, S_1, S_2, \dots, m_1, m_2, \dots \rangle$ , los  $S_i$  son objetos absolutos, mientras que los  $m_i$  son objetos dinámicos que cambian en correspondencia con sus respectivas ecuaciones de campo<sup>14</sup>.

En los modelos  $\langle M, g, T \rangle$  de la TGR,  $g$  y  $T$  son objetos dinámicos. Encuentro algo obstinado desconocer la naturaleza material de los objetos dinámicos, común a los modelos de todas nuestras teorías, simplemente para salvar una doctrina ontológica. Sería algo obstinado desconocer la naturaleza material del campo gravitacional  $g$ . El campo gravitacional es un objeto dinámico material como todos los demás campos de fuerza. La TGR recibe, por tanto, su interpretación natural como una teoría relacional en la que las estructuras espaciotemporales son absorbidas por un campo material  $g$ .

<sup>11</sup>Es claro que las estructuras espaciotemporales cambian detalles formales en el paso del espacio newtoniano, a los espaciotiempos neo-newtoniano y tipo-Minkowski de la relatividad especial, pero en todos los casos se está de acuerdo sobre cuáles son esencialmente las estructuras espaciotemporales. Éstas son, básicamente, estructura métrica e inercial. De todas formas no sobra recordar que incluso en el contexto de la dinámica newtoniana es posible integrar el potencial gravitacional en la conexión afín  $\Gamma$  -como curvatura variable- pero en este caso la conexión afín se dinamiza de la mano del campo gravitacional y parece más natural considerarla entonces como un campo de materia. A este respecto véase especialmente **Friedman** (1983), Cap 4: *Gravitation Theory: Curved Space-Time*, pp 108-114.

<sup>12</sup>Nótese que la distinción también aplica a cualquier modelo mecanocuántico ya que en estos casos los campos físicos se definen sobre fondos espaciotemporales absolutos. Incluso en los casos en que se intenta formular modelos mecanocuánticos sobre espaciotiempos curvos, éstos espaciotiempos son representados como estructuras fijas -no dinámicas-.

<sup>13</sup>La distinción entre los objetos absolutos y los objetos dinámicos de las teorías espaciotemporales es originaria de **Anderson** (1967 p. 83-84) y es bien tratada por **Friedman** (1984 p. 47-60)

<sup>14</sup>En general las ecuaciones de campo tienen la estructura  $D\varphi = \sigma$  donde el lado izquierdo de la ecuación representa la estructura diferencial del campo (i.e. un operador  $D$  actuando sobre el campo  $\varphi$ ) y el lado derecho ( $\sigma$ ) representa las fuentes de éste. En todos los casos ambos lados de la ecuación -el campo y las fuentes- son entendidos como objetos materiales ya que los campos son portadores de energía. Esta equivalencia material izquierda-derecha es rota por la interpretación substantialista (SS) de la TGR.

<sup>15</sup>Nótese que esta distinción entre objetos absolutos que caracterizan la estructura espaciotemporal -el fondo fijo- y objetos dinámicos -que representan la materia y su evolución- se aplica únicamente a los objetos (campos) que se cuelgan sobre la variedad. La variedad proporciona la estructura topológica y diferencial requerida por estos objetos. Pero no es en sí misma cobijada por la distinción. Su falta de estructura no permite entenderla ni como un espaciotiempo de fondo, en el caso de teorías con variedad absoluta (fija), ni como un objeto material -no es portadora de ningún tipo de interacción, ni tiene la estructura de un campo- en caso de teorías con variedad dinámica (TGR).

La TGR es una teoría completamente dinámica. Este es quizá su aspecto más revolucionario. Todos sus modelos son de la forma  $\mathcal{N} = (M, m_1, m_2, \dots)^{15}$ .

En todo caso la interpretación del campo gravitacional como un campo físico de fuerzas, descansa, en alguna medida en la viabilidad para entenderlo como una entidad portadora de energía-momento, al igual que todos los demás campos. Y aunque casi nadie duda que la energía del campo gravitacional se intercambie libremente con la energía de los demás campos -de hecho se supone que es la fuente de las grandes cantidades de energía liberada en la forma de radiación y calor en la descripción del colapso estelar-, en la TGR, como consecuencia del principio de equivalencia, no se tiene una buena definición local de la densidad de energía del campo gravitacional. Es una asignatura pendiente de resolver en la TGR, estrechamente vinculada con los problemas para cuantizar el campo gravitacional. De todas formas, que la energía no sea 'localizable' en regiones infinitesimales no significa que no exista, al menos, una forma aproximada para hacer estimaciones físicas empíricamente contrastables. Lo que se tiene es una definición cuasi-local (i.e. localizable en regiones finitas del espaciotiempo) de la energía del campo gravitacional para una clase restringida de modelos de la TGR (Szabados 2004) o un pseudotensor que representa la densidad de energía en ciertos sistemas de coordenadas<sup>16</sup>.

Aunque los pseudotensores no den una buena definición local de la energía del campo gravitacional sus integrales son útiles para calcular la energía gravitatoria de sistemas relativamente aislados. En la práctica se han utilizado para calcular la radiación gravitacional generada por sistemas autogravitantes. El primero en hacerlo fue **Einstein**. En su momento se llegó a discutir si las ondas gravitacionales eran reales o meros artificios de los sistemas de coordenadas pero **Bondi** y otros (1957, 1963) mostraron que se trataba de efectos intrínsecos y el análisis específico de ondas cortas de **Isaacson**

(1968) pareció confirmarlo. Las predicciones sobre la energía radiada gravitacional han sido empíricamente contrastadas al menos para el pulsar binario PSR 1913+16 descubierto por **Hulse** y **Taylor** en 1974. Y a pesar de los problemas para tener una definición (local) de la energía gravitacional y su conservación, éstas consideraciones inclinan hoy a la inmensa mayoría a aceptar la realidad de la energía de las ondas gravitacionales y en general de la energía del campo gravitacional en la TGR. Estoy de acuerdo.

## 5. Algo más sobre la variedad: ¿Hay espaciotiempo?

Debido a las tensiones que siguen existiendo al interior del debate R-S, con respecto al rol desempeñado por la variedad quisiera despejar cualquier duda sobre el estatus ontológico de la misma. Ésta dejó de ser considerada como un espaciotiempo que alojaba campos físicos ya que, hemos visto, la falta de identidad primitiva de los puntos que la componen y la carencia de estructuras que le permitan alcanzar algún rol explicativo en los fenómenos físicos son razones fuertes para dejar de considerarla como el contenedor espaciotemporal de todos los fenómenos físicos.

La variedad proporciona la estructura diferencial y topológica para levantar cualquier teoría de campos. Es incluso menos estructurada que la posible métrica utilizada por algún Leibniziano. Algunos substantialistas han equivocado este asunto al objetar el uso de la variedad y otras estructuras *espaciotemporales* en la concepción relacional de una teoría física<sup>17</sup>. El asunto importante en realidad pasa por determinar si el espaciotiempo físico puede -o no- funcionar como una entidad independiente de la presencia de materia conservando su poder explicativo, soportando la dinámica de la teoría.

En la TGR los puntos de la variedad no tienen identidad, ni siquiera la estructura topológica está determinada en forma independiente por la colección de puntos. Éstos sólo pueden elevarse a la categoría de posibles

<sup>16</sup>En Cala 2008 se presentan en detalle las dificultades para localizar la energía del campo gravitacional y para formular una correcta ley de la conservación de energía-momento en la TGR. Allí se concluye que estas dificultades están directamente relacionadas con la estructura dinámica-relacional de la teoría. Esto porque, en resumen, la Teoría General de la Relatividad carece de un fondo espaciotemporal independiente y, como consecuencia de ello la TGR carece también de objetos absolutos cuyas simetrías globales permitirían una formulación adecuada de la ley de conservación de energía-momento.

<sup>17</sup>**Earman**, por ejemplo, no ha dejado de manifestar su malestar porque, en principio, la teoría de campos requiere en el fondo algún tipo de sustanciación ya que éstos especifican sus cantidades en función de las coordenadas adaptadas a un fondo espacial sustancial al estilo de la variedad de la TGR. **Earman** no duda que el campo gravitacional haga parte de los contenidos materiales del espaciotiempo, pero el uso de este tipo de puntos (no individuados) de la variedad le llevó a sugerir que el debate debía dirimirse fuera de las formas tradicionales de entender el substantialismo y el relacionismo (**Earman** 1989, p.208).

eventos espaciotemporales cuando un tensor métrico específico -un campo material- es definido sobre la variedad. Incluso la estructura topológica global requiere la especificación del tensor métrico. En cierto sentido, la variedad es también una estructura dinámica ya que ésta cambia de modelo a modelo de la teoría de la mano del campo gravitacional<sup>18</sup>. Su estructura dinámica es heredada del campo gravitacional vía ecuaciones de campo (Stachel 1994, Isham 1994, Sorkin 1997). De modo que al remover el campo gravitacional no puede hablarse, en sentido alguno, del significado físico o espaciotemporal de la variedad.

El espacio (y el tiempo) newtoniano, por el contrario, puede pensarse sin la presencia de ningún objeto material. Removida la materia éste conserva toda la riqueza de su estructura espaciotemporal. Este no es el caso en la TGR. Ni siquiera la variedad -insisto- retiene algún tipo de significado espaciotemporal sin la presencia del campo gravitacional. Todo es materia en la TGR. Al remover la materia desaparece con ella el espaciotiempo. No existe, ni siquiera como hipótesis teórica, la posibilidad de definir un espaciotiempo vacío. La Teoría General de la Relatividad es, en definitiva, una teoría relacional sobre el espaciotiempo. Esta es mi conclusión general, como también esta fue la conclusión madura de **Einstein**.

En la edición de 1954 de su *Relativity, The Special and the General Theory* (la última antes de su muerte), **Einstein** incluyó un apéndice especial. Éste se titulaba *Relativity and the Problem of Space*. Para cerrar, le cito en cierta extensión porque considero que este no deja dudas al respecto (**Einstein** 1954 Appendix V, P.155):

*We are now in a position to see how far the transition to the general theory of relativity modifies the concept of space. In accordance with classical mechanics and according to the special theory of relativity, space (space-time) has an existence independent of matter or field. [...] On the basis of the general theory of relativity, on the other hand, space as opposed to 'what fills space', which is dependent on the co-ordinates, has no separate existence. Thus a pure*

*gravitational field might have been described in terms of the  $g_{ik}$  (as functions of the co-ordinates), by solution of the gravitational equations. If we imagine the gravitational field, i.e. the functions  $g_{ik}$ , to be removed, there does not remain a space of type (I)<sup>19</sup>, but absolutely nothing, and also no 'topological space'. For the functions  $g_{ik}$  describe not only the field but, at the same time also the topological and metrical structural properties of the manifold. A space of type (I), judged from the standpoint of the general theory of relativity, is not a space without field, but a special case of the  $g_{ik}$  field, for which -for the co-ordinate system used, which itself has no objective significance- the functions  $g_{ik}$  have values that do not depend on the co-ordinates. There is no such thing as empty space, i.e. a space without a field. Space-time does not claim existence on its own, but only as a structural quality of the field<sup>20</sup>.*

## 6. Conclusión

A pesar de que circula la versión según la cuál la TGR instancia la existencia de un espacio-tiempo físico independiente de la presencia de objetos materiales o de la ocurrencia de fenómenos, concluyo que resulta más conveniente e inteligible la interpretación relacional del espaciotiempo en la TGR. Los puntos de la variedad espaciotemporal no tienen identidad primitiva y ello obliga a trasladar la discusión sobre la existencia física del espaciotiempo al poder explicativo de las estructuras espaciotemporales que se cuelgan sobre esta entidad, es decir, al rol desempeñado por el tensor métrico y los campos materiales (portadores de energía-momento) en la dinámica relativista. Y aunque el tensor métrico codifica, por así decirlo, la estructura cronogeométrica típicamente adjudicada a un espacio substantivalista al estilo del espacio newtoniano, puede mostrarse que estas estructuras cronogeométricas pueden recibir un tratamiento genuinamente relacional (**Barbour y**

<sup>18</sup>La variedad no tiene forma local intrínseca. Ésta es heredada de los tensores definidos sobre ella y éstos a su vez la cargan de estructura.

<sup>19</sup>Aquí por (I), Einstein se está refiriendo al espaciotiempo de Minkowski. Éste hubiera sido inaceptable en la época en que el *problema del espacio* se había convertido para Einstein en el problema de satisfacer el principio de Mach. Pero, incorporada consistentemente la noción de campo a la de objeto material, no existe, ni siquiera teóricamente, la posibilidad de un espacio vacío sin la presencia de materia. Difícilmente puede uno imaginarse algo más relacional.

<sup>20</sup>El énfasis es mío.

Bertotti 1982, Pooley y Brown 2001), con lo cual se necesitan razones más fuertes para elevar la métrica al estatus ontológico de un espaciotiempo independiente. Los campos materiales -y la materia en general- son portadores de energía-momento y son representados en *todas* las teorías espaciotemporales por objetos dinámicos en el sentido de la geometría diferencial (Anderson 1967, Friedman 1983). No existe, por tanto, una razón fuerte para suponer que el tensor métrico, objeto dinámico portador de energía-momento, no caiga en esta clasificación. Se trata de un objeto material en toda regla. Las estructuras cronogeométricas son subsidiarias de un objeto material extendido: el campo métrico o gravitacional. Ello obliga a concluir, con Einstein, que si se remueve la materia también se remueve el espaciotiempo; la tesis relacional.

**Agradecimientos.** Deseo agradecer a un anónimo revisor científico quien contribuyó con pertinentes observaciones a mejorar la presentación y el contenido de este artículo.

#### Referencias

- [1] Alexander, H. G. (ed) (1984) *The Leibniz Clarke Correspondence (1717)*. Barnes and Noble. New York.
- [2] Anderson, J. L. (1967) *Principles of Relativity Theory*. Academic Press. New York
- [3] Ashtekar, A. 'Geometric Issues in Quantum Gravity', en *The Geometric Universe: Science Geometry and The Work of Roger Penrose*
- [4] Baez, J. C. (2001) 'Higher-dimensional algebra and Planck scale physics', en *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*, C. Callender y N. Hugget (eds.) Cambridge University Press. Cambridge, pp. 177-198.
- [5] Barbour, J. B. (1982) 'Relational Concepts of Space and Time' *British Journal for the Philosophy of Science*, **33**, pp 251-274.
- [6] Barbour, J. B. (1994) 'The timelessness of quantum gravity: I The evidence from the classical theory, II The appearance of dynamics in static configurations'. *Class. and Quant. Grav* **11**, pp. 2853.
- [7] Barbour, J. B. & Bertotti, B. (1982) 'Mach's principle and the Structure of Dynamical Theories' *Proceedings of the Royal Society*, **382**, pp 295-306.
- [8] Barbour, J. B., Foster, B.Z., & Murchadha, N. (2002) 'Relativity without Relativity' *Class. Quantum Grav.* **19**, pp. 3217. Disponible en *gr-qc/0012089*.
- [9] Bartels, A. (1996) 'Modern essentialism and the problem of individuation of spacetime points', *Erkenntnis* **45**, pp 25-43.
- [10] Belot, G. (1998) 'Why General Relativity Does Need an Interpretation' *Philosophy of Science (Proceedings)*, **63**, pp. 80-88.
- [11] Belot, G. & Earman, J. (2001) 'Pre-Socratic Quantum Gravity', en *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*, C. Callender y N. Hugget (eds.) Cambridge University Press. Cambridge, pp. 213-255.
- [12] Brighouse, C. (1994) 'Spacetime and Holes', en *PSA 1994, Vol 1*, D. Hull, M. Forbes, y R. Burian (eds.). East Lansing Michigan. Michigan, pp. 117-125.
- [13] Bondi, H. (1957) *Nature*, **179**, p. 1072.
- [14] Bondi, H., J. van der Burg, M. G. & Metzner, A. W. K. (1962) *Proceedings for The Royal Society*, **A 269**, p.21-51.
- [15] Butterfield, J. & Isham, C. J. (1999) 'On the Emergence of Time in Quantum Gravity', en *The Arguments of Time*, J. Butterfeld (ed.). Oxford University Press, Oxford. pp. 111-168.
- [16] Cala, F. E. (2006) 'La Identidad de las Partes del Espacio y el Problema de la Inercia' *Praxis Filosófica*, **22**, pp. 153-169.
- [17] Cala, F. E., Gómez, A. R. & Ramos, J. F. (2007) 'De la Relatividad de la Inercia al Universo Cerrado' *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, **31**(118), pp. 97-108.
- [18] Cala, F.E. (2008) 'Sobre la Dinámica Relacional del Espacio-Tiempo y la Conservación de la Energía en la Teoría General de la Relatividad' *TEORÍA: Revista de Teoría, Fundamentos e Historia de la Ciencia*, en prensa.
- [19] Callender, C. & Hugget, N. (eds.) (2001) *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*, Cambridge University Press. Cambridge.
- [20] DiSalle, R. (1994) 'On dynamics, indiscernibility, and spacetime ontology', *British Journal for the Philosophy of Science*, **45**, pp. 265-287.
- [21] Earman, J. (1970) 'Who's Afraid of Absolute Space', *Australian Journal of Philosophy*, **48**, pp 287-317.
- [22] Earman, J. (1986) *A Primer on Determinism*. D. Reidel. Dordrecht, The Netherlands.
- [23] Earman, J. & Norton, J. (1987) 'What Price Space-Time Substantivalism? The Hole Story', *British Journal for The Philosophy of Science*, **38**, pp 515-525.
- [24] Earman, J. (1989) *World Enough and Space-Time*. MIT Press. Cambridge, Massachusetts.
- [25] Einstein, A. (1914) 'Prinzipielles zur verallgemeinerten Relativitätstheorie', *Physikalische Zeitschrift*, **15**, pp 176-180.
- [26] Einstein, A. (1918) 'Prinzipielles zur allgemeinen Relativitätstheorie', *Annalen der Physik*, **55**, pp 241-244.
- [27] Einstein, A. (1954) 'Relativity and the Problem of Space', Appendix 5, *Relativity: The Special and General Theory*. 15 edición. Methuen.
- [28] Friedman, M. (1983) *Foundations of Space-Time Theories*. Princeton University Press. Princeton.



- [29] **Hawking, S. W. & Ellis, G. F. R.** (1973) *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge University Press. Cambridge.
- [30] **Hofer, C.** (1994) 'Einstein's Struggle for a Machian Gravitation Theory', *Studies for the History and Philosophy of Science*, Vol. 25, 3, pp 287-335.
- [31] **Hofer, C.** (1996) 'The Metaphysics of Space-Time Substantivalism', *The Journal of Philosophy*, 93, pp. 5-27.
- [32] **Hofer, C.** (1998) 'Absolute Versus Relational Spacetime: For Better or Worse, the Debate Goes On', *British Journal for the Philosophy of Science*, 49, pp. 451-467.
- [33] **Isaacson, R. A.** (1968) *Physical Review*, 166, p.1263-1272.
- [34] **Isham, C.** (1994) 'Prima Facie Questions in Quantum Gravity', en *Canonical Quantum Gravity: From Classical to Quantum (Lecture Notes in Physics 434)*. J Ehlers y H. Friedrich (eds.). Springer-Verlag. Berlín, pp.1-21.
- [35] **Kretschmann, E.** (1917) *Annalen der Physik* 53, pp. 575-614.
- [36] **Laymon, R.** (1978) 'Newton's Bucket Experiment', *Journal of the History of Philosophy*, 16, pp 399-413.
- [37] **Mach, E.** (1883) *The Science of Mechanics*. Trad. de T.J Mc Cormack. Open Court. La Salle, Illinois. 1960.
- [38] **Maudlin, T.** (1993) 'Buckets of Water and Waves of Space: Why Spacetime is Probably a Substance', *Philosophy of Science*, 60, pp. 183-203.
- [39] **Mundy, R.** (1992) 'Space-Time and Isomorphism', en *PSA 1992, Vol 1*, D. Hull, M. Forbes, y K. Okruhlik (eds.). East Lansing Michigan. Michigan ,pp. 515-527.
- [40] **Nagel, E.** (1961) *The Structure of Science*. Harcourt, Brace and World. New York.
- [41] **Pooley, O. & Brown, H. R.** (2001) 'Relationism Rehabilitated? I: Classic Mechanics'. *British Journal for the Philosophy of Science*, 53, pp 183-204. E Print en <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000220>.
- [42] **Pooley, O.** (2002) 'Relationism Rehabilitated? II: Relativity'. E Print en <http://philsci-archive.pitt.edu/archive/00000221>.
- [43] **Reichenbach, H.** (1957) *Space and Time*. Dover. New York.
- [44] **Rovelli, C.** (1996) 'Relational Quantum Mechanics', *International Journal of the Theoretical Physics*, 35, pp 1637.
- [45] **Rovelli, C.** (1997) 'Halfway Through the Woods: Contemporary Research on Space and Time', en *The Cosmos of Science: Essays of Exploration*, J. Earman y J. Norton (eds.). University of Pittsburgh Press. Pittsburgh, pp 180-223.
- [46] **Rynasiewicz, R.** (1996) 'Absolute Versus Relational Space-Time: An Otomodded Debate?' , *Journal of Philosophy*, 93, pp.279-306.
- [47] **Saunders, S.** (2002) 'Indiscernibles, General Covariance, and Other Symmetries: The Case for Non-Reductive Relationism', en *Revisiting the Foundations of Relativistic Physics*, J. Renn (ed.). Kluwer Press.
- [48] **Saunders, S.** (2003) 'Physics and Leibniz Principles', en *Symmetries in Physics: Philosophical Reflections*, K. Brading and E. Castellani (eds.), Cambridge University Press.
- [49] **Sklar, L.** (1976) *Space, Time, and Space-Time*. University of California Press. Berkeley.
- [50] **Smolin, L.** (1991) 'Space and Time in the Quantum Universe', en *Conceptual Problems of Quantum Gravity*, A. Ashtekar, y J. Stachel (eds.). Birkhäuser. Boston, pp 228-291.
- [51] **Sorkin, R. D.** (1997) 'Forks in the Road, on the Way to Quantum Gravity', *International Journal of Theoretical Physics*, 36, pp. 2759-81.
- [52] **Stachel, J.** (1993) 'The Meaning of General Covariance', en *Philosophical Problems of the Internal and External Worlds: Essays on the Philosophy of Adolf Grünbaum*, J. Earman, A. Janis, G. Massey, y N. Rescher, (eds.), Pittsburgh University Press. Pittsburgh, pp. 129-160.
- [53] **Stachel, J.** (1994) 'Changes in the Concepts of Space and Time Brought About by Relativity', en *Artifacts, Representation and Social Practice*, C.C. Gould y R.S. Cohen (eds.). Kluwer Academic. Dordrecht, pp. 141-162.
- [54] **Stein, H.** (1970), 'Newtonian space-time', en *The Annus Mirabilis of Sir Isaac Newton 1666-1966*. The M. I.T. press. Cambridge, Mass., pp. 258-284.
- [55] **Szabados, L. B.** (2004) 'Quasi-Local Energy-Momentum and Angular Momentum in GR: A Review Article.' , *Living Rev. Relativity*, 7, 4.
- [56] **Teller, P.** (1991) 'Substances, Relations and Arguments About the Nature of Spacetime', *The Philosophical Review*, C3, pp. 363-97.
- [57] **Wald, R. M.** (1984) *General Relativity*. University of Chicago Press. Chicago.
- [58] **Zanstra, H.** (1928) 'A study of relative motion in connection with classical mechanics', *Physical Review*, 23, nn 528-545.

Recibido: noviembre 8 de 2007

Aceptado para publicación: diciembre 3 de 2008