



Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia

ISSN: 0124-4620

ISSN: 2463-1159

revistafilosofiaciencia@unbosque.edu.co

Universidad El Bosque

Colombia

Castrejón, Gilberto

Sobre el estatus ontológico del espaciotiempo. Una respuesta al realismo estructural\*  
Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia, vol. 19, núm. 39, 2019, Julio-, pp. 43-84

Universidad El Bosque

Colombia

DOI: <https://doi.org/10.18270/rcfc.v19i39.2803>

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41465953002>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UNEM  
redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## **Sobre eL estatus ontoLógiCo deL espaCiotiempo. Una respuesta aL realismo estruCturaL\***

### **On THE ontOLOGICAL status of spACETIME. A RESPONSE to STRUCTURAL REALISM**

GILBERTO CASTREJÓN

Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada  
Unidad Legaria Instituto Politécnico Nacional  
Ciudad de México, México.

[gcastrejon@ipn.mx](mailto:gcastrejon@ipn.mx)

#### **resumen**

El problema del realismo sobre el espaciotiempo gira en torno de si es una substancia o una relación entre substancias. Para el realismo estructural óntico, “el espaciotiempo es una estructura real encarnada en el mundo”, donde la preeminencia la tiene la estructura matemática, de aquí su estatus ontológico. En este artículo configuro una respuesta a dicho realismo estructural, argumentando que la idea de una “metafísica de estructuras”, que da primacía ontológica a las estructuras por sobre los objetos, no logra evitar los inconvenientes de algunos aspectos básicos del realismo tradicional sobre el espaciotiempo.

**Palabras clave:** realismo estructural; relatividad general; espaciotiempo; substancialismo; relacionismo.

\* Este artículo se debe citar: Castrejón, Gilberto. “Sobre el estatus ontológico del espaciotiempo. Una respuesta al realismo estructural”. *Rev. Colomb. Filos. Cienc.* 19.39 (2019): 43-84. <https://doi.org/10.18270/rcfc.v19i39.2803>

## abstraCt

The problem of realism about spacetime revolves around whether it is a substance or a relationship between substances. For the ontic structural realism: “spacetime is a real structure embodied in the world”, where the mathematical structure has the preeminence, hence its ontological status. In this paper I set up a response to this structural realism, arguing that the idea of a “metaphysics of structures”, which gives ontological primacy to structures over objects, fails to avoid the inconveniences of some basic aspects of traditional realism over spacetime.

**Keywords:** structural realism; general relativity; spacetime; substantialism; relacionism.

## 1. IntroducciÓn

El llamado realismo estructural óntico<sup>1</sup> (REO) (French & Ladyman 2003; Ladyman 1998; Ladyman et ál. 2007) postula que la ontología del mundo está dada por las estructuras. En este sentido, apuesta por una “metafísica de estructuras” en lugar de una “metafísica de objetos”. Muchas han sido las críticas que desde distintos frentes se le han hecho, sobre todo a la versión más radical del REO (Bueno 2010; Calvo Vélez 2006; Cao 2003; Chakravartty 2003; Lam & Wüthrich 2015; Madrid-Casado 2009; Psillos 1995, 2001; Rivadulla 2010; Van Fraassen 2006),<sup>2</sup> específicamente

---

<sup>1</sup> Desde que Worral (1989) introdujo el realismo estructural como una respuesta al problema de la metainducción pesimista y el argumento del no milagro, dicha postura realista ha atraído una enorme atención. El autor proclamaba un realismo estructural epistémico, según el cual en la ciencia lo que perdura son las estructuras, y puede que no sea posible conocer ciertas entidades teóricas que las teorías científicas postulan.

<sup>2</sup> En general, existen dos versiones del REO, la radical y la moderada. Las tesis de la versión moderada se deben sobre todo a los trabajos de Dorato (2000, 2008) y Ensfield & Lam (2008). El primero defiende que el espaciotiempo es una “estructura ejemplificada” como una forma de relacionismo; los segundos consideran el espaciotiempo como estructura y los objetos ocupan el mismo estatus ontológico. Los argumentos que aquí defiende van más encaminados a hacer una crítica a la versión radical del REO (Bain 2006, 2013; French & Ladyman; Ladyman et ál.2007).

en dos de sus premisas básicas: la insistencia en que “las estructuras son lo único que hay”, y por tanto, los objetos no poseen preeminencia ontológica; y en que la naturaleza de dichas estructuras resulta ser meramente matemática. En conjunción con estos aspectos, la tesis radical del REO respecto al problema del realismo sobre el espaciotiempo puede resumirse en las palabras de uno de sus más prominentes defensores:

Por tanto, como una forma de realismo con respecto al espaciotiempo, el estructuralismo del espaciotiempo puede ser caracterizado por lo siguiente: (a) No es un substancialismo. No es un compromiso con los puntos espaciotemporales. (b) No es un relacionismo. No adopta una actitud antirrealista hacia el espaciotiempo. (c) Más bien, éste afirma que el espaciotiempo es una estructura real encarnada en el mundo (Bain 2006 64).

Atendiendo a lo anterior, el REO está inspirado en dos características de la física moderna: 1) los fundamentos de la mecánica cuántica, en cuanto a que la noción de “objeto individual” deja de tener sentido (French & Ladyman 2003; Ladyman 2007; Ladyman et ál. 2007); por lo que respecto al realismo del espaciotiempo no puede hablarse de una identidad e individualidad de los puntos espaciotemporales, y 2) el carácter matemático formal que ha adquirido la física, según el cual las estructuras matemáticas pueden aprovecharse para sustentar las tesis del REO, en conjunción con el carácter contradictorio de lo que podría entenderse por “objeto físico” (Bain 2006, 2013; Ladyman et ál. 2007; Tegmark 2008), lo que implicaría concebir al espaciotiempo como una “estructura física” cuyo carácter es matemático.

Tradicionalmente en el contexto de la teoría general de la relatividad (TGR), el realismo sobre el espaciotiempo gira en torno de dos posturas: *substancialismo*: “El espaciotiempo es una sustancia” y *relacionismo*: “El espaciotiempo es una relación entre sustancias”. Asimismo, el problema estriba en identificar qué clase de entidad es el espaciotiempo, cuál es su estatus ontológico, ¿es una entidad que existe independientemente de los objetos?

La estrategia de este artículo consiste en configurar una respuesta a algunas de las tesis del REO sobre el problema del realismo del espaciotiempo, de aquí el énfasis

en su estatus ontológico. En la segunda sección establezco las coordenadas de análisis del debate entre substancialistas y relacionistas; en la siguiente, desde la perspectiva de algunos de los defensores del REO, analizo cómo estos tratan el problema del realismo sobre el espaciotiempo; en la cuarta sección, presento algunos argumentos contra dichas posturas; en las conclusiones, complemento la respuesta al REO, en términos de que sus argumentos no resuelven suficientemente los inconvenientes que surgen desde el debate entre substancialistas y relacionistas.

Uno de los puntos medulares de mi argumento es que algunos defensores del REO no distinguen claramente entre un realismo de estructuras (propiamente matemáticas) y un realismo de entidades (de carácter físico), lo que no permite avanzar satisfactoriamente acerca de cuál es el estatus ontológico del espaciotiempo. También señalo que desde ciertos aspectos formales, vinculados a lo que se ha denominado “realismo semántico”, le surgen al REO varios problemas al no poder explicar el “isomorfismo entre los fenómenos físicos y las estructuras matemáticas”. Finalmente, identifico el problema de si se puede ser realista postulando una “nueva metafísica” en la ciencia, que deja a un lado el fisicalismo, donde la primacía la tienen los objetos, la materia, dando paso a “una primacía de las estructuras”.

## **2. EL realismo sobre el espaciotiempo: substancialistas vs. relacionistas**

La TGR puede caracterizarse en términos de modelos de espaciotiempo (Earman & Norton 1987). Un modelo corresponde a una variedad diferenciable<sup>3</sup>  $M$  pseudo-riemanniana<sup>4</sup> de dimensión 4, junto con objetos geométricos  $g_{\mu\nu}$  y  $T_{\mu\nu}$  definidos en

---

<sup>3</sup> Una *variedad diferenciable* es una variedad topológica (variedad de Riemann) en la que pueden extenderse las nociones del cálculo diferencial, definidas en espacios euclidianos. En la variedad diferenciable pueden definirse funciones diferenciables y campos de tensores diferenciables.

<sup>4</sup> Una *variedad riemanniana* corresponde a una generalización del espacio euclidiano, en la cual se generaliza la métrica, por ejemplo,  $R^2$ , el plano, es una variedad diferenciable.

cada punto de la variedad:  $\langle M, g_{\mu\nu}, T_{\mu\nu} \rangle$ ; tal que  $M$  posee una estructura intrínseca,  $g_{\mu\nu}$  es el tensor métrico y  $T_{\mu\nu}$  el tensor de energía-momento, que contiene la información sobre la presencia de masa y energía en cada punto de la variedad. Tales objetos, definidos sobre  $M$ , permiten representar las propiedades (dinámicas) y relacionales de los puntos (Rickles 2008). Según lo anterior, la variedad  $M$  representa los puntos del espaciotiempo con propiedades y relaciones absolutas, determinadas por la estructura topológica y diferencial de dicha variedad. Asimismo, un modelo de espaciotiempo corresponde a soluciones de las ecuaciones de campo de Einstein:<sup>5</sup>  $G_{\mu\nu} = kT_{\mu\nu}$ , donde  $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R$  es el llamado tensor de Einstein,  $R_{\mu\nu}$  es el tensor de curvatura de Ricci y  $R$  es la curvatura escalar. Además, si  $\langle M, g_{\mu\nu}, T_{\mu\nu} \rangle$  es un modelo, y  $d$  es un difeomorfismo,<sup>6</sup> entonces  $\langle M, d^*g_{\mu\nu}, d^*T_{\mu\nu} \rangle$  también es un modelo de espaciotiempo, y ambos modelos deben ser equivalentes, es decir, representan la misma situación física.

Ahora bien, respecto al problema del realismo sobre el espaciotiempo se tienen dos respuestas (Dieks 2006, 2008; DiSalle 2008; Dorato 2008; Earman 1989; Friedman 1987; Huggett; Sklar 1977). Estas respuestas, substancialismo y relacionismo, se desarrollan en las secciones siguientes.

## 2.1 Substancialismo

Una postura substancialista considera que el espaciotiempo es una clase de objeto que *podría*, en consistencia con las leyes de la naturaleza, existir independientemente

<sup>5</sup> En la versión de las ecuaciones de campo que involucra lo que se conoce como “constante cosmológica”:  $\Lambda$ , en el lado izquierdo de las ecuaciones, se suma el término:  $\Lambda g_{\mu\nu}$ . La constante cosmológica fue incluida por Einstein, con la finalidad de obtener una solución de las ecuaciones de campo que diera un universo estático.

<sup>6</sup> Un difeomorfismo es una aplicación de  $M$  a  $M$ , tal que posee una aplicación inversa, y ambas aplicaciones son diferenciables.  $d: M \rightarrow M$

te de las cosas materiales: se describe con propiedades intrínsecas, por encima de las propiedades de las cosas materiales que podrían ocupar partes de este. En tal concepción, el espaciotiempo tendría su significación específica como parte de la “ontología primitiva”<sup>7</sup> de la TGR. En esta teoría, los objetos geométricos básicos, de los cuales puede predicarse existencia, serían: la variedad diferenciable  $M$  (conjunto de puntos con una estructura topológica y diferencial), el campo gravitacional (representado por el tensor métrico  $g_{\mu\nu}$ ), y el tensor de energía-momento  $T_{\mu\nu}$ .

Según Carl Hoefer (1996), se debe aceptar un substancialismo de la variedad más el campo métrico  $M + g_{\mu\nu}$ , puesto que la variedad  $M$  no es suficiente para distinguir entre direcciones espaciales y temporales, dado que solo es una estructura topológica sin propiedades geométricas esenciales para entender el concepto de espaciotiempo, y propiedades como identificar relaciones: “antes de”, “simultáneo a” y “después de” (Romero 2013). Así, Hoefer propugna que se debe aceptar que el campo métrico sería el que mejor representa al espaciotiempo.

Robert Rynasiewicz (1996) afirma que con la llegada de las “teorías de campos”, específicamente lo que el autor llama la “visión electromagnética de la naturaleza”, puede considerarse la TGR como una “teoría de campos”, con lo que resultaría poco consistente distinguir entre “contenedor” y “contenido”. Como Dean Rickles (2008) menciona, en el substancialismo debe haber “una clara distinción entre ‘ma-

---

<sup>7</sup> Puede entenderse por ontología primitiva (Allori 2013) el que toda teoría física fundamental tiene una estructura común. Para el caso de la TGR, esta estaría definida por:

- Un acuerdo con el mundo (imagen manifiesta), el cual parece ser constituido por objetos macroscópicos tridimensionales con propiedades bien definidas.
- El conjunto de objetos, de la ontología primitiva de la teoría, vive en un espacio o en el espaciotiempo. Las historias, a través del tiempo, de estos objetos, proveen una imagen del mundo acorde a la teoría.
- El formalismo de la teoría contiene variables primitivas para describir la ontología primitiva y variables no primitivas, que matemáticamente implementan cómo se envuelven en el tiempo las variables primitivas.
- Las propiedades de los objetos macroscópicos se siguen de un claro esquema explicativo en términos de la ontología primitiva.

teria' y 'espaciotiempo'", lo que implicaría decidir por una "prioridad ontológica" de la materia o del espaciotiempo. Para un substancialista, la prioridad la tiene el espaciotiempo, independientemente de concebirlo como "contenedor" o como el campo gravitacional (tensor métrico). De esto último, Rynasiewicz deduce que si algún substancialista considerara el campo métrico como representando al espaciotiempo, dicho campo métrico no admite definitivamente una interpretación como contenedor o contenido, ni como "estructura sustantiva" ni como "estructura relativa".

Por su parte, Carl Hoefer (1996) piensa que el substancialismo podría tener significación si se centrara más alrededor del estatus ontológico del campo métrico, debido a la naturaleza dinámica de este en el ámbito de la TGR. Esto se relaciona con postular un substancialismo del campo métrico, referido directamente a las ecuaciones de campo, y considerar que tal "campo métrico puede existir sin materia".

Cabe señalar que concebir el espaciotiempo como campo métrico nos conduciría a sostener que quizá los campos podrían interpretarse como que definen ciertas propiedades de la variedad diferenciable  $M$ . Dado que "un objeto geométrico campo" sobre  $M$  es una correspondencia  $F$  que le asigna a cada punto  $p$  de  $M$  con coordenadas  $X_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ), una cuádrupla de números reales  $F_i$ , por lo que resulta factible definir un substancialismo de tipo  $M + g_{uv}$  (Maudlin 1989; Stachel 1993). Siendo así, una cuestión que surgiría aquí tiene que ver con la existencia e identidad de los puntos espaciotemporales, es decir: ¿estos existen o son solo "etiquetas" de los eventos o fenómenos? Esta última interpretación de la TGR es la que el REO retoma como básica para argumentar contra la existencia del espaciotiempo en términos substancialistas, en favor del espaciotiempo como estructura, negando a su vez la identidad e individualidad de los puntos espaciotemporales.

El substancialismo se considera como una preferente interpretación realista, la cual presupone una estructura geométrica, que es natural interpretar como primitiva y como físicamente instanciada en una entidad ontológicamente independiente de la materia, el espaciotiempo (Pooley 2013). De aquí que el espaciotiempo, definido por la variedad diferenciable  $M$ , tendría su significación específica como parte de la "ontología primitiva" de la TGR. Sería, por tanto, una estructura topológica de dimensión 4, y a su vez, una "substancia física". El substancialista acepta la existencia de la



materia y los campos, los cuales son ontológicamente distintos al espaciotiempo, sea este entendido como el campo métrico o como la variedad (o acaso como  $M + g_{\mu\nu}$ ).

Así, un substantialista postula una estructura geométrica del espaciotiempo (aunque más bien como su representación); además de asignar identidad física a los puntos espaciotemporales, debe negar el “argumento del agujero”<sup>8</sup> (Earman & Norton 1987) y de cierta forma darle un cierto sentido óntico a la geometría (Friedman 1987; Maudlin 2014). En esta interpretación, los cuerpos se mueven describiendo una geodésica, la cual se debe a la presencia de materia-energía, que constriñe al espaciotiempo a curvarse, por lo que existen a su vez ciertos objetos geométricos como el tensor métrico o el tensor de energía-momento, cuyo estatus ontológico sería distinto al del espaciotiempo.

## 2.2 ReLacionismo

Una postura relacionista plantea que el espaciotiempo no goza de una existencia propia; lo que hay son relaciones entre objetos materiales y “los posibles patrones de las relaciones espaciotemporales entre ellos” (Rovelli 2008). Afirmar que el espacio o el espaciotiempo es una relación significaría que el mundo consiste enteramente de objetos físicos, los cuales tendrían la propiedad de estar o no en contacto unos con

---

<sup>8</sup> El “argumento del agujero” se refiere a que para un modelo de relatividad general  $\langle M, g_{\mu\nu}, T_{\mu\nu} \rangle$  existe un difeomorfismo  $d^*$  (del “agujero”) y una región  $D \in M$  donde  $d^*: M \rightarrow M$ , y tal que  $d^*$  sobre  $D$  es una aplicación de identidad “afuera y sobre la frontera de  $D$ ”, pero no “adentro”. Del resultado anterior, ya visto por Einstein, se ha interpretado que si se acepta un substantialismo (identidad de los puntos espaciotemporales), entonces debe aceptarse un indeterminismo en la TGR (Earman & Norton 1987). Formalmente, debe haber una correspondencia 1-1 entre el difeomorfismo sobre  $M$  y la transformación de coordenadas en un sistema coordinado particular de  $M$ , es decir, el difeomorfismo mapea un punto  $p$  en un punto  $d^*p$ . Basta señalar que los inconvenientes del “argumento del agujero” tienen que ver con las posibilidades empíricas de sus consecuencias, debido al indeterminismo en la “región Hole”:  $D$ .

otros, por lo que el espacio (o el espaciotiempo) sería este “estar en contacto”. Para el relacionista, no existe el espaciotiempo como una entidad independiente de la materia, más bien, “la presencia de materia permite que emerjan el espacio y el tiempo a partir de cómo se ubica dicha materia” (Montesinos 2007 69).

Parafraseando a Poincaré (1952), solo tenemos noción de las relaciones entre estos objetos reales, las cuales son la única realidad que podemos alcanzar. Para un relacionista, el espaciotiempo debe ser definido a través de la materia, por lo que la prioridad ontológica la tendría esta. Así, un relacionista como Carlo Rovelli afirma:

Por tres siglos, el espacio ha sido considerado como la entidad preferida con respecto a la cual todas las demás entidades son localizadas. En los siglos XX y XXI y con la relatividad general hemos aprendido que no es necesario este marco para en su lugar guardar realidad. La realidad guarda en sí misma su lugar. Los objetos interactúan con otros objetos, y esto es la realidad. La realidad es la red de estas interacciones. No necesitamos una entidad externa para sostener esta red. No necesitamos al espacio para sostener el universo (2008 32).

En este sentido, para el relacionista, lo único fundamental serían la materia y los campos, como el campo gravitacional. En esta interpretación, los cuerpos se mueven por la interacción propiamente de dos campos, el campo gravitacional y el tensor de energía-momento. Esto es:

La relatividad general está basada en la observación de que todo lo que existe en el universo son campos de materia, independientemente de la manifestación concreta de estos campos. No existe “espacio” ni “tiempo” *a priori*, i.e., sin la presencia de materia. La materia da origen, por decirlo así, a las nociones de tiempo y espacio. Los campos de materia no existen en el “espacio” y “tiempo”, sino que la existencia objetiva de ésta genera tales nociones. El aspecto fundamental es simplemente la existencia de la materia. La variedad y las coordenadas, que etiquetan los puntos de ésta, son sólo herramientas auxiliares en la descripción de los fenómenos físicos, y deben ser eliminados cuando se

requiera hacer predicciones de la teoría compatibles con la covarianza bajo difeomorfismos de la relatividad general (Montesinos 2007 69).

El debate sobre el realismo del espaciotiempo deja claro que dentro del marco epistémico de la TGR conviven distintas concepciones ontológicas, cada una con su muy particular manera de concebir al espaciotiempo. El punto que me interesa señalar aquí es que, desde una postura realista, si se afirma que “una teoría representa al mundo”, como se cree lo es la TGR, de ahí se podrían obtener elementos para afirmar la existencia y naturaleza de las entidades que postula, pero tales entidades deberían estar libres de controversias. A este tenor, el REO parece tener una respuesta a dicho problema (sección 3), la cual considero que no logra del todo librar algunos de los inconvenientes que surgen del debate presentado (sección 4).

### **2.3 algunos Inconvenientes del debate entre substancialistas y relacionistas del espaciotiempo**

Aquí pretendo plantear ciertos problemas todavía no resueltos que ambas posturas presentan, considerando que estos resultan ser suficientes, como complemento, para configurar una respuesta a la postura del REO sobre el espaciotiempo.

1. Si en el enfoque substancialista,  $M$ , la variedad diferenciable, es el espaciotiempo, entonces, ¿se le otorga “realidad física” a una estructura matemática, es decir, un sentido óntico?; desde esta perspectiva, ¿el espaciotiempo existe como un conjunto de puntos con propiedades de una estructura matemática o de una estructura física?, ¿ $M$  existe como entidad física o como entidad matemática?
2. Si desde el substancialismo del campo métrico  $(M + g_{\mu\nu})$ ,  $g_{\mu\nu}$  representa al campo gravitacional y, a su vez, este corresponde al espaciotiempo, ¿no es acaso un objeto geométrico que se especifica para cada punto o región, y por algo, se debe, en cierto sentido, aceptar la existencia de los puntos espaciotemporales?

3. Para una postura relacionista, la solución de las ecuaciones de campo en el vacío<sup>9</sup> representa un dilema, puesto que parecería implicar que el espaciotiempo existe, y posee una estructura y propiedades, independientemente de la presencia de materia. Una solución a las ecuaciones de campo para este caso es el espaciotiempo de Minkowski de la relatividad especial, aunque no es la única solución.
4. Sea en una o en otra postura, dado que precisamente recurren a una representación geométrica, de aquí, ¿los puntos espaciotemporales poseen hecceidad?<sup>10</sup>
5. Dado que ambos enfoques tienen como base formal las ecuaciones de campo, ¿en qué sentido un modelo de espaciotiempo representa literalmente al espaciotiempo físico?, ¿la única condición es el isomorfismo<sup>11</sup> entre la estructura física y la estructura matemática?, ¿no surge con esto un problema de cardinalidad<sup>12</sup> entre una estructura matemática y una estructura física?
6. ¿Cómo explica cada uno de estos realismos lo que es un “evento en el espaciotiempo”? Si es entendido este último como “algo que sucede y se representa” en la variedad diferencial  $M$ , entonces, ¿un evento solo es un “etiquetado” de cierto fenómeno? o ¿este es una representación literal?
7. Si se es un substancialista sobre el espaciotiempo, se debe explicar qué tipo de sustancia es, ya que la explicación geométrica no resuelve completamente la cuestión. Cabría incluso aquí la pregunta: ¿qué tipo de

<sup>9</sup> Si hay ausencia de materia, las ecuaciones de campo son:  $R_{\mu\nu} - (1/2)g_{\mu\nu}R = 0$ . Esta nulidad no implica que el espaciotiempo pueda ser plano; en el vacío (ausencia de materia), el tensor de curvatura de Ricci es cero en todas partes, es decir, todas sus componentes son cero. Lo que sí podría implicar que el espaciotiempo sea plano es que todas las componentes del tensor de Riemann sean cero.

<sup>10</sup> Esencia, lo que hace que una entidad posea propiedades. Asimismo, define identidad e individualidad.

<sup>11</sup> En términos generales, un isomorfismo es una función biyectiva  $f: B \rightarrow C$  entre dos conjuntos. Es biyectiva porque a cada elemento  $x$  de  $B$  le corresponde solo un elemento  $y$  de  $C$ . Pretende captar la idea de que ambos conjuntos tienen la misma estructura.

<sup>12</sup> La *cardinalidad* de un conjunto se refiere al número de elementos que este contiene.

relación física existe entre el espaciotiempo y la materia?, ¿dicha relación es de tipo causal?

8. Preguntar sobre si existe el espaciotiempo es a su vez separar la pregunta entre (a) si existe únicamente como estructura matemática y (b) si existe únicamente como entidad física. ¿Cuál de las dos posturas realistas configura una mejor respuesta a la cuestión?
9. En cualquier postura realista, hay que apelar a regiones, conjuntos de puntos, etc., por tanto, dichas interpretaciones no quedan exentas de responder al “argumento del agujero”. Con respecto a este último, el caso de la postura substancialista ha sido tratado por Earman y Norton (1987), quienes proponen que si se acepta el substancialismo de la variedad, se niega a su vez el determinismo. Un autor como Tim Maudlin (2014) considera que el argumento no tiene que ver con aspectos empíricos, pues solo habla de una situación posible. Lo mismo afirma Jeremy Butterfield (1989), al plantear que el argumento solo se refiere a “meras representaciones matemáticas”, pero, ¿acaso no debe haber una consistencia del principio de covarianza<sup>13</sup> para modelos de la teoría? Esto último tiene que ver que un aspecto sustantivo de los modelos de espaciotiempo (sección 4.1).
10. Si la idea de una entidad espaciotiempo, de carácter dinámico, no es más que una manera bastante fértil para representar y explicar ciertos fenómenos, y su poder explicativo es por demás evidente, ¿hace falta especular sobre su existencia, sobre si es o no un ente del mundo, y

---

<sup>13</sup> Las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia, ya sea inerciales o en presencia de gravedad. Todos los sistemas de referencia son indistinguibles y equivalentes. Sobre este principio el mismo Einstein afirmaba: “*Las leyes generales de la naturaleza deben expresarse por ecuaciones que sean válidas para todos los sistemas de coordenadas. Es decir, sean covariantes con respecto a cualesquiera sustituciones (generalmente covariantes)*” (Einstein 2005 441).

predicar cierta naturaleza de este, ya sea substancial o relacional? Surge aquí la idea de entender al espaciotiempo solo como una entidad de carácter heurístico en el marco epistémico de la TGR, lo que podría apoyar el enfoque relacionista. ¿Cómo juega lo anterior, ya sea a favor o en contra, respecto del REO del espaciotiempo?

### **3. EL espaciotiempo en el realismo estructural óntico**

Quisiera comenzar con una anécdota de Ian Hacking, presentada en su ya clásico texto *Representar e intervenir*, sobre cómo se convenció de la existencia de los electrones. El autor se refiere a un experimento de física de partículas, basado en el experimento de Millikan de la gota de aceite (que permitió encontrar la carga del electrón), pero que para el caso de la física de partículas pretendía calcular la carga de un quark ( $\pm 1/3$  la carga del electrón) mediante una gota de niobio. Al final de la anécdota, Hacking menciona:

Ahora bien, ¿cómo alteramos la carga de la bola de niobio? Pues bien, “en este estadio”, dijo mi amigo, “la rociamos con positrones para aumentar la carga o con electrones para disminuir la carga”. A partir de ese día he sido un realista científico. *Hasta donde a mí concierne, si se puede rociar algo con ellos, entonces son reales* (1996 41).

Esta singular situación nos permite recordar una de las premisas básicas del realismo científico: la existencia de las entidades que una teoría postula, y que en el contexto del REO, resulta ser una premisa un tanto controversial, dados los logros de la física moderna, por lo que habríamos de apostar por una especie de “metafísica de las estructuras”.

Así, el REO considera que la primacía ontológica la tienen las estructuras, no los objetos, de manera que:

Existen relaciones modales entre los fenómenos (tanto posibles como actuales) pero esas relaciones no son supervenientes a propiedades de objetos inobservables, y de relaciones entre estos. En cambio, esta estructura es ontológicamente básica. Esto es suficiente para hacer al realismo estructural diferente del realismo estándar (Ladyman et ál. 2007 128).

Para el caso específico del espaciotiempo, este correspondería a “una estructura matemática encarnada en el mundo”. Es decir, el espaciotiempo sería un “objeto geométrico de dimensión 4” con propiedades relacionales. Y por tanto, la primacía ontológica la tendría la estructura (matemática), no la materia, el campo gravitacional o el tensor de energía-momento. Además, el carácter matemático-estructural de dicha estructura estaría dictado por la teoría de grupos.

En la presente sección me enfoco en revisar las posturas que ciertos representantes del REO han presentado respecto al problema del realismo sobre el espaciotiempo.

### 3.1 EL reo y el formalismo estándar de la tgr

En primera instancia, me referiré a algunos de los argumentos que el REO considera para sustentar el carácter matemático de las estructuras. Jonathan Bain (2006, 2013) ha tratado los aspectos formales de la TGR en un conjunto de artículos, sobre todo al tomar el formalismo tensorial estándar de las teorías clásicas de campos, la teoría de grupos y la teoría de categorías, y se inclina por un realismo estructural del espaciotiempo. En uno de sus primeros trabajos, Bain (2006) busca responder a la cuestión: si es posible hacer la teoría clásica de campos, sin una variedad diferenciable  $M$  de dimensión 4, ¿qué podría sugerir esto respecto al realismo semántico del espaciotiempo? Este postula una realidad de los modelos matemáticos de las teorías, “una *literal interpretación* de las sentencias que hacen las teorías a través de sus modelos” (Earman & Norton 1987; Horwich 1982).

Lo que hace Bain (2006) es indagar sobre el estatus ontológico del espaciotiempo desde el formalismo tensorial estándar de las teorías clásicas de campos (que

consideran una variedad cuatridimensional diferenciable  $M$ ), e identifica su equivalencia en la teoría twistor, las álgebras de Einstein y el álgebra geométrica. Cabe señalar que todo formalismo, en el contexto de la TGR, debe atender a isomorfismos entre variedades, y a la vez, cumplir el principio de covarianza respecto a que las ecuaciones deben preservar su forma bajo difeomorfismos. Bain resalta que mientras los alternativos formalismos difieren en cuanto a la clase de “ontología de individuos”, estos mismos formalismos están de acuerdo en el nivel de la estructura, con lo cual concluye:

La estructura conforme, por ejemplo, puede ser realizada en muchos diferentes tipos de “individuos”: puntos de la variedad, twistors o multivectores... Qué es real, el estructuralista del espaciotiempo afirmará, la estructura en sí, y no la manera en que alternativos formalismos la instancian...; el espaciotiempo es una estructura real que es encarnada en el mundo (Bain 2006 64).

En este sentido, el estatus ontológico del espaciotiempo se refiere a que este es una estructura matemática real, puesto que en los distintos formalismos lo que se preserva es la estructura. El sustento formal de los argumentos del autor se refiere a que al obtener la equivalencia de la TGR en los distintos formalismos:<sup>14</sup>

- Puede construirse una relación de isomorfismo entre conjuntos.
- Por lo que dichos conjuntos, dígame la variedad diferenciable  $M$  y las álgebras de Einstein, etc., poseen la misma cardinalidad.<sup>15</sup>

<sup>14</sup> Esta equivalencia se debe entender en que pueden obtenerse modelos en el nuevo conjunto; por ejemplo, en las álgebras de Einstein: una tripleta  $(R^\infty, R, g)$ , donde  $R^\infty$  es un anillo conmutativo (estructura algebraica),  $R$  un subanillo de  $R^\infty$  isomorfo a los números reales y  $g$  es un mapeo multilineal definido sobre el espacio de derivadas de  $(R^\infty, R)$  y su espacio dual, y que a su vez satisface las ecuaciones de Einstein (Geroch 1972).

<sup>15</sup> Existe un aspecto problemático relacionado con la cardinalidad y los isomorfismos entre conjuntos, vinculado a las tesis del REO. El caso de la mecánica cuántica ya ha sido tratado por Madrid-Casado (2009). El autor se refiere a la demostración de von Neumann de que hay un isomorfismo entre



- Si se obtiene una equivalencia entre el formalismo tensorial estándar y el formalismo de las álgebras de Einstein, se “pierde” el darle sentido a una ontología de objetos, identificando una primacía de la estructura.

Los argumentos de Bain (2006) se sostienen desde la teoría de grupos continuos de transformaciones,<sup>16</sup> según la cual si puede haber una correspondencia entre dos conjuntos, y dicha correspondencia preserva entre estos la estructura conforme,<sup>17</sup> entonces puede esto apoyar un realismo estructural. Para el caso específico de la TGR, el autor obtiene la equivalencia entre un modelo clásico de espaciotiempo (véase sección 2.2) y las álgebras de Einstein o la teoría twistor, y concluye que lo que se preserva es la estructura matemática, lo cual para él opera a favor del REO del espaciotiempo. Por lo que “El hecho de que estos modelos son isomórficos indica que ellos comparten una estructura común”. Asimismo, en un trabajo posterior, Bain (2013) mantiene su compromiso con el realismo estructural del espaciotiempo, intentando dar respuesta a diversas críticas, al considerar que desde la teoría de categorías<sup>18</sup> puede sostenerse el REO.

---

la formulación matricial y la de ondas, mecánica matricial (MM) y mecánica de ondas (MO), respectivamente. El argumento de Madrid-Casado toma el enfoque de la teoría de la representación matemática, tal que si precisamente hay un isomorfismo entre MM y MO, entonces debe haber también un isomorfismo entre la realidad que MM proyecta (RMM) y la realidad de MO (RMO), lo que a su vez debería verse reflejado en que RMM y RMO deberían tener la misma cardinalidad, lo cual no es el caso. RMM es discreta, y RMO es continua. La conclusión del autor es que las realidades que ambas formulaciones representan no pueden ser isomórficas.

<sup>16</sup> La teoría de grupos continuos de transformaciones en espacios abstractos generalizan los conceptos de rotación y traslación de cuerpos materiales en atención a las reglas del movimiento en espacios euclidianos o no euclidianos.

<sup>17</sup> La estructura corresponde a un conjunto con operaciones y relaciones entre los elementos del conjunto.

<sup>18</sup> “Una categoría **C** consiste de objetos **A**, **B**, ..., y morfismos entre objetos  $f: \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{B}, \dots$ ” (Bain 2013 1623). A su vez, deben cumplirse tanto morfismos de identidad para cada objeto, como morfismos entre cada par de objetos, a la vez de la ley asociativa para estos; además, “la teoría de conjuntos puede ser formulada como una categoría, un conjunto, en el cual los objetos son conjuntos, y los morfismos son funciones definidas sobre los conjuntos” (Bain 2013 1623). El autor pretende dar cuenta de críticas a su enfoque del REO (Dorato 2008; Esfeld & Lam 2008; Wüthrich 2009; Dorato 2008), al considerar que un marco

Uno de los problemas con la perspectiva de Bain, como lo veremos en la siguiente sección, tiene que ver con un aspecto formal de la TGR, dado que dicha teoría es una Gauge Theory (teoría de norma), carácter propio con el que comúnmente se encuentran modelos físicamente aceptables de espaciotiempo en la TGR, dada la relevancia del tipo de simetrías gauge.<sup>19</sup> Asimismo, el autor sustenta su REO en casos que resultan más de carácter heurístico, donde la relevancia de su enfoque estriba, por ejemplo para el caso de las álgebras de Einstein, en el estudio de singularidades espaciotemporales.<sup>20</sup> ¿Qué es una singularidad? Una característica topológica del espaciotiempo, como un agujero negro, cuyos aspectos estructurales dependen directamente de considerar objetos como campos y materia. Por tanto, ¿cómo estudiar las características de la estructura espaciotiempo sin considerar relatas? Asimismo, el enfoque del autor debe atender al problema de cómo diferenciar entre una estructura física y una matemática.

### 3.2 EL REO y La física moderna

James Ladyman et ál., en una postura más radical, sentencian que *la física moderna motiva una metafísica de realismo estructural óntico* (2007), específicamente lo

---

estructural adecuado para fundamentar un realismo estructural lo ofrece la teoría de categorías. Bain identifica que la raíz de las críticas se ubica en cómo se definen relaciones y relatas en el contexto de la teoría de grupos, que da sentido a dichas críticas, por ello intenta dotar al REO de un marco formal donde pueda presentarse una noción de estructura carente de apelar a relatas. Aun así, Vincent Lam y Christian Wüthrich (2015) han mostrado que la teoría de categorías no logra del todo ser un marco adecuado para sustentar un realismo estructural, pues desde la teorías de categorías sigue apelándose a relatas.

<sup>19</sup> Sobre la importancia de las simetrías gauge puede consultarse el volumen de Brading y Castellani, en especial el artículo de Michael Redhead: “The Interpretation of Gauge Symmetry”.

<sup>20</sup> Para mayores detalles sobre estos aspectos puede verse Geroch, aunque el autor no se enfocó en tratar aspectos observacionales en su formulación. Un tratamiento interesante sobre la importancia de las álgebras de Einstein en la TGR, puede encontrarse en Heller (1992).

que concierne a las dos grandes teorías en que está cimentada: la mecánica cuántica y la relatividad. Estos autores son enfáticos para el caso del realismo sobre el espaciotiempo. Consideran que este denota una estructura matemática sin “objetos individuales”, en la cual *alguna medida tomada en cualquier parte del universo es en parte una medida de esta estructura*. (2007) Lo anterior está basado en dos aspectos esenciales del REO, ejemplificados por la física moderna:

- La herramienta apropiada para representar teorías científicas es la matemática.
- Las relaciones entre sucesivas teorías, y teorías en diferentes escalas ya sea espacio-temporales o energéticas, son a menudo relaciones restringidas y de semejanza a estructuras matemáticas (formalmente capturadas por estructuras que preservan mapeos o morfismos de varias clases), al igual que las relaciones lógicas entre proposiciones.

Para los autores, lo que hay son “patrones reales” que llegan a “comportarse como objetos”, en otros casos como eventos y procesos. “Desde el punto de vista metafísico, lo que existe son sólo patrones reales”<sup>21</sup> (Ladyman et ál. 2007 121).

De todo lo anterior se sigue que respecto al problema del realismo sobre el espaciotiempo, la preeminencia ontológica la tendría aquello que instancia dichos patrones, esto es, la estructura matemática. Se define así una “metafísica de estructuras” que pretende sustentar un realismo del espaciotiempo. “El realismo estructural óntico (REO) es el punto de vista de que el mundo tiene una estructura modal objetiva que es ontológicamente fundamental, en el sentido de que no sobreviene sobre las propiedades intrínsecas de un conjunto de individuos” (Ladyman et ál. 2007 130).

Para Ladyman et ál. (2007) los problemas con respecto al estatus ontológico del espaciotiempo, en términos del debate substancialistas vs. relacionistas, estriban

---

<sup>21</sup> Los autores complementan afirmando: “Uno comienza por localizar patrones reales, y entonces descubre su descripción estructural” (Ladyman et ál. 2007 122).

en la insistencia de interpretar al espaciotiempo en términos de una ontología de entidades subyacentes y sus propiedades. De este modo, dar respuesta al problema del realismo sobre el espaciotiempo sería entender la TGR como una teoría en la que resulta secundaria la descripción de entidades con identidad e individualidad. La primacía la tiene la estructura relacional en la que dichas entidades están embebidas. Se habla así de una “ontología de estructuras”, no de objetos o materia. Se anuncia por tanto una nueva metafísica. Sin embargo, ¿cuáles serían las categorías que sostienen dicha “metafísica de estructuras”?

Considero que no es del todo viable una “metafísica de estructuras” para fundamentar la física moderna, sobre todo porque, entre otros aspectos, el contenido de las mismas teorías de la física sigue atendiendo al fisicalismo, lo que da incluso sustento a sus aspectos experimentales. El REO tiene que explicar adecuadamente lo que desde su “nueva metafísica” entiende por “objeto físico”, ¿este sería solo el tipo de entidad que una teoría de la física postula, aunque posea distinta naturaleza entre las diversas formulaciones de la teoría? Como es sabido, el REO considera que lo que se preserva en las teorías es la estructura. A continuación daré una respuesta a los argumentos del REO desde los dos frentes tratados en la presente sección.

#### **4. Una respuesta al realismo estructural óntico del espaciotiempo**

En términos generales, el REO afirma que las relaciones espaciotemporales de los objetos quizá no podrían sobrevenir en propiedades intrínsecas, pero sí en las propiedades relacionales de los relata que son mutuamente independientes; de aquí la preeminencia ontológica de la estructura; sin embargo, ¿cómo puede afirmarse que se conoce una estructura sin apelar a relatas?, y asimismo ¿la ciencia solo da cuenta de propiedades extrínsecas de los relata, puesto que estas son relacionales y permiten conocer estructuras? Responder afirmativamente a ambas cuestiones implicaría que las propiedades espaciotemporales, así como la identidad e individualidad de los objetos, se reducen a meramente aspectos relacionales.

Los argumentos del REO nos llevan a aceptar una disolución de lo físico por lo matemático, esto es, un cambio de ontología, que da preeminencia a las estructuras matemáticas por sobre las sustancias, los objetos. En el caso del espaciotiempo, habría que aceptar que existe solo como estructura matemática, lo cual define su estatus ontológico. Sin embargo, ¿cómo se podría entender que el espaciotiempo es a su vez una estructura física “encarnada en el mundo”?

#### 4.1 Estructuras matemáticas como estructuras físicas

El REO de Jonathan Bain atiende a aspectos formales. Su apuesta se ubica en una de las premisas principales del REO: lo que hay son estructuras matemáticas. Por ello en la visión de autores como Tian Yu Cao (2003), esto se vierte en “un intento de disolver las entidades físicas en estructuras matemáticas”. De lo anterior surgen problemáticas como el papel de los isomorfismos en las teorías, la naturaleza de la representación, el sentido óntico de las entidades matemáticas, etc.

Bain afirma que “el espaciotiempo es una estructura matemática encarnada en el mundo” (2006 64). Es partidario de que los isomorfismos tienen un papel primordial, dado que las estructuras matemáticas con las que las teorías describen el mundo se relacionan con los fenómenos físicos “a través de isomorfismos, isomorfismos parciales, similaridad, o algún vínculo análogo” (Borge 2017 79). Por ello, al establecer isomorfismos entre conjuntos (la teoría twistor, las álgebras de Einstein y el álgebra geométrica) desde la teoría clásica de campos, para el problema del estatus ontológico del espaciotiempo, llega a la conclusión de que lo que se preserva es la estructura, independientemente del aspecto sustantivo del espaciotiempo en diferentes formulaciones de la TGR.<sup>22</sup>

<sup>22</sup> Con relación a este problema, Roger Jones planteó lo que se conoce en la literatura como la “Jones Undetermination”, en contra del realismo científico. Él afirma que la existencia de los distintos formalismos de una teoría, que difieren en el nivel de su ontología, precisamente indetermina el argumento semántico

En atención a lo anterior, cabe señalar que Ruy Utiyama (1956) demostró que la TGR es una “teoría de norma” (Gauge Theory)<sup>23</sup> asociada al grupo de Lorentz. Lo que conduce a identificar que el lenguaje descriptivo de la TGR no es único, pues puede considerarse el campo gravitacional como una variedad riemanniana (enfoque geométrico) o como un “campo normado” (enfoque de espacios abstractos). Dicha formulación mostró que el lenguaje descriptivo (geométrico) con el que se presentan las ecuaciones de campo de Einstein no es el único posible. ¿No es acaso una condición formal que generaliza un aspecto meramente matemático y que permite establecer isomorfismos entre conjuntos que cumplen el principio de covarianza<sup>24</sup>? El argumento de Bain, por tanto, resulta un tanto evidente desde su aspecto meramente formal, dado que el mismo carácter de la TGR sustenta que puedan obtenerse equivalencias de la teoría en distintos espacios. El verdadero problema que se le plantearía tiene que ver con las razones de que efectivamente una estructura matemática “represente literalmente el mundo”, aspecto que deja de lado en su argumentación. El hacer modelos de espaciotiempo en distintos conjuntos, como los que Bain lleva

---

realista de interpretar literalmente las teorías, lo que de manera extensiva también impacta en las tesis del REO. Andrés Rivadulla (2010) ha tratado también este aspecto, sobre todo en términos de una tesis fuerte del REO, que el autor llama “un dogma del realismo estructural”: la conservación de las estructuras respecto al cambio teórico enciende.

<sup>23</sup> “Las teorías gauge (normadas) están basadas en dos conceptos matemáticos fundamentales, desarrollados alrededor del siglo XIX: los espacios matemáticos abstractos y la teoría de grupos continuos de transformaciones” (Hacyan 20077). Los espacios abstractos pueden definirse sin apelar a sistemas de coordenadas; los grupos continuos de transformaciones en espacios abstractos generalizan los conceptos de rotación y traslación de cuerpos materiales, en atención a las reglas del movimiento en espacios euclidianos o no euclidianos. Lo importante es que puede obtenerse una generalización del movimiento (global), es decir, las ecuaciones dinámicas, a partir de una simetría particular (local), que puede ser descrita en un álgebra no conmutativa, que forma un grupo de Lie. Un álgebra conmutativa es una rama de las álgebras abstractas, enfocada en el estudio de los anillos conmutativos, esto es, estructuras algebraicas donde pueden definirse operaciones conmutativas entre los elementos de dicha estructura. Un grupo de Lie es una estructura matemática, con ciertas relaciones (operaciones) que pueden establecerse entre los elementos.

<sup>24</sup> *Principio de covarianza*. Las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia, ya sea inerciales o en presencia de gravedad. Todos los sistemas de referencia son indistinguibles y equivalentes.

a cabo, tiene más interés heurístico, y no sustantivo, esto último relacionado con el estatus ontológico del espaciotiempo.

El argumento contra el REO del espaciotiempo de Bain que pretendo configurar retoma un aspecto ya señalado por John Earman (2006) respecto a la ontología del espaciotiempo en el marco de la TGR. El autor distingue entre:

- a. Un enfoque formal del principio de covarianza de la TGR, donde las leyes deben preservarse bajo difeomorfismos, condición de un adecuado modelo de la TGR, y ad hoc con el enfoque de Utiyama (1956). Lo que puede incidir tanto neutral como negativamente en los aspectos de contenido de la teoría, dado que llega a restringir el considerar solo modelos con “simetrías gauge”, lo cual Bain pretende atender al escribir modelos de TGR en álgebras de Einstein, teoría twistor y álgebra geométrica, a pesar de que el mismo autor reconoce que no existe una completa equivalencia en alguno de los modelos que él trata;<sup>25</sup> y
- b. Un enfoque sustantivo, donde, si se satisfacen las condiciones de covarianza para dos modelos  $\langle M, g_{\mu\nu}, T_{\mu\nu} \rangle$  y  $\langle M, d^*g_{\mu\nu}, d^*T_{\mu\nu} \rangle$ , con  $d$  un difeomorfismo, entonces ambos modelos representan la misma situación física. Lo último permite sustentar que hacer modelos de la TGR en distintos espacios, que implícitamente contienen la idea de isomorfismo y cardinalidad entre conjuntos, da sustento a que “lo que predomina es la estructura matemática”, siempre y cuando puedan establecerse condiciones observables.

<sup>25</sup> Es el caso del formalismo de la teoría twistor. Bain reconoce que, para este caso, no puede obtenerse una total equivalencia entre el formalismo tensorial clásico de las teorías de campo, en espaciotiempos con contenido masivo de materia y el formalismo twistor. ¿No es acaso un hecho significativo, que juega en contra del enfoque de Bain, dada la importancia del formalismo tensorial de la TGR para el análisis de modelos de espaciotiempo con contenido masivo de materia? (Puede verse Bain 2006).

Sin embargo, esa misma consideración semántica del REO (inciso a), que si bien juega a favor del contenido de los modelos de la TGR, también sustenta que el mismo contenido se debe referir a objetos, no solo a estructuras. Asimismo, la relevancia de considerar el enfoque sustantivo (inciso b) tiene que ver directamente con encontrar modelos de espaciotiempo que sean físicamente aceptables. En el contexto del inciso a, hacer modelos de espaciotiempo en álgebras de Einstein, por ejemplo, es relevante para el estudio de singularidades,<sup>26</sup> lo cual da cabida a por qué es importante dicha formulación en términos heurísticos y experimentales concretos, pero no permite tener una visión global y estructural, físicamente hablando, del espaciotiempo físico. ¿Dónde queda aquí el aspecto ontológico (sustantivo), geométrico y estructural del espaciotiempo, cuando el objetivo es solo analizar aspectos concretos? Cabe señalar que los modelos de espaciotiempo generalmente aceptados por la comunidad científica son los que precisamente atienden a simetrías gauge,<sup>27</sup> a la vez que los modelos más relevantes consideran los aspectos geométricos y topológicos “representables”. ¿Cómo aceptar que distintas formulaciones representan literalmente la estructura del espaciotiempo, cuando estas solo se usan para abordar problemas que más bien parecen “excentricidades matemáticas”? Cada modelo aceptable de espaciotiempo debe ser *físicamente interpretable*, en el sentido de que los *objetos* que el modelo concibe deben estar asociados a ciertos conceptos físicos, tener un correlato con algún fenómeno físico y cumplir con el “principio cosmológico”.<sup>28</sup> Todo lo

<sup>26</sup> El artículo de Rosenstock et ál. (2015) hace una sustanciosa revisión de la relación entre las álgebras de Einstein y el espaciotiempo relativista.

<sup>26</sup> Como Michael Redhead señala: “The gauge principle is generally regarded as the most fundamental cornerstone of modern theoretical physics. In my view its elucidation is the most pressing problem in current philosophy of physics” (2003 138). Asimismo, *gauge principle* puede traducirse como principio de norma.

<sup>26</sup> En general, los modelos (soluciones de las ecuaciones de campo) de la TGR, que se considera representan la forma del universo, deben atender al llamado “principio cosmológico”: a gran escala, 1) el universo es espacialmente homogéneo, y 2) el universo es espacialmente isotrópico (el mismo para cualquier observador y en cualquier dirección). Dichos modelos, que podrían considerarse “físicamente representables”, atienden a simetrías gauge, a la vez que permiten configurar condi-



anterior permite considerar una “ontología fundamental” para los modelos de espaciotiempo, que tiene en cuenta aspectos geométricos y objetos fundamentales, como campos o el tensor de energía-momento. Obtener modelos en distintas estructuras a la geométrica, como las estructuras algebraicas, podría no tener relevancia, si tales modelos no tienen objetos que posean un correlato empírico, y una equivalencia con los objetos geométricos de la *ontología fundamental*.

Además, mi objeción al enfoque de Bain también está relacionada con el carácter propio de la TGR, que ya Roger Jones había mencionado:

Para aplicar la teoría al mundo concreto uno debe asumir una solución de las ecuaciones de campo. Pero es desconocida una solución que describa todos los detalles del cosmos conocido, y casi ciertamente se desconoce esta, y todas las soluciones conocidas son enormes idealizaciones. Para algunas soluciones, las estructuras pueden ser definidas con atributos que hemos asociado con conceptos tales como espacio, tiempo, masa, energía, carga y momento. A veces estas estructuras pueden ser definidas convenientemente, otras veces las definiciones son extremadamente incómodas, y a menudo no están disponibles (1991 175).

El autor está señalando los problemas de carácter ontológico en las distintas formulaciones de los modelos en la TGR. Desde esta perspectiva, el espaciotiempo parece ser una entidad “difícil de ubicar” de manera precisa en términos ontológicos, sobre todo en modelos contruidos en espacios cuya estructura no es geométrica. ¿Se puede seguir siendo realista respecto a la entidad básica, el espaciotiempo, que la TGR postula? Bain (2006) pretendió dar cuenta de este problema planteado por Jones, sin embargo, su argumento no logra superar los inconvenientes que he identificado

---

ciones observacionales. El ejemplo clásico de este tipo de modelos es la solución de Schwarzschild, respecto a cómo obtener soluciones exactas de las ecuaciones de campo de Einstein para un campo gravitacional exterior de un cuerpo estático, esféricamente simétrico, tal como el Sol. Al respecto, véase Wald (1984).

anteriormente. Jones muestra que en la física moderna las teorías no comparten ontologías (caso específico de la TGR y la mecánica cuántica) y que en una misma teoría existen varias formulaciones que dan paso a considerar ontologías distintas (caso analizado por Bain). ¿Cómo se puede ser realista estructural cuando la teoría exhibe distintos modelos con ontologías diferentes? Ni siquiera el que Bain se dedique a demostrar que pueden obtenerse distintos modelos de la TGR, en diferentes estructuras matemáticas, resulta ser un argumento contundente a favor del REO del espaciotiempo, dado que, por ejemplo, Bain reconoce que resulta complicado encontrar una total equivalencia entre los *objetos* de dichas estructuras<sup>29</sup> y el formalismo tensorial clásico de la TGR.

Otro inconveniente que identifico en el REO de Bain es que considera como un hecho que existe un isomorfismo<sup>30</sup> entre “una realidad de objetos y fenómenos físicos”<sup>31</sup> y una realidad matemática. De aquí surge una de las principales objeciones al REO, ya señalada por van Fraassen, Psillos (2001) y Cao (2003), entre otros: ¿cómo, en principio, algo que solo es matemático, puede representar fielmente algo que no lo es? Y en este mismo sentido: ¿el isomorfismo entre un “conjunto físico” y

<sup>29</sup> “Debe observarse que no se ha dado una descripción twistor consistente para campos masivos o teorías de campo en espaciotiempos con contenido de materia. Esencialmente, como he observado, el formalismo twistor es construido sobre invariancia conforme, y surgen problemas cuando estas llegan a representarse en teorías clásicas de campos en invariancia no conforme. Esto indica que el formalismo twistor no se puede expresar completamente equivalente al formalismo tensorial...” (Bain 2006 45-46).

<sup>30</sup> Bain no se detiene a analizar una de las premisas básicas del enfoque semántico estructuralista de las teorías, ya sentenciado por Sneed (1971): “Si un modelo de una teoría es adecuado, entonces existe un *isomorfismo* entre estructuras abstractas y estructuras reales”. Parecería que se da por hecho que “la naturaleza posee una estructura de tipo algebraico”. Si de entrada en el REO de Bain se supone una relación de identidad entre “un conjunto abstracto y otro que no lo es”, entonces, ¿qué es la representación que se ejemplifica en los modelos?

<sup>31</sup> Ejemplo de este tipo de REO es la postura de Tegmark (2008).

<sup>32</sup> Bain (2013) ha intentado dar respuesta a este y otros problemas del REO en general asumiendo que un mejor fundamento de la ontología en términos estructuralistas la ofrece la teoría de categorías. Aun así, Vincent Lam y Christian Wüthrich (2015) han dado una respuesta al plantear que la teoría de categorías no ofrece un marco suficiente para sustentar una ontología de estructuras.

uno matemático, da cuenta de que ambos conjuntos tienen la misma cardinalidad?<sup>32</sup> (Calvo Vélez 2006). Si se aplica a lo anterior uno de los postulados básicos del realismo científico: “existe una realidad externa que podemos conocer”, ¿podríamos establecer una clara distinción entre “realidad física” y “realidad matemática”<sup>33</sup>? Como bien menciona Bruno Borge: “¿cómo es posible mantener de modo significativo una distinción si se postula una identidad entre ambas? Podría pensarse que la pretendida identidad enmascara una suerte de emergencia de la realidad física de una estructura matemática más fundamental” (2017 77). A su vez, ¿cómo puede sustentarse que el estatus ontológico del espaciotiempo se refiere a un aspecto meramente estructural y matemático, cuando de una u otra forma el contenido de los modelos debe referirse a relatas, a “algo en el mundo”? Todo modelo de espaciotiempo toma condiciones iniciales. Este es el punto de partida de su conexión con relatas; por algo la sentencia del REO de que “la estructura es lo único que hay” nos debe un relato sobre cómo dicha estructura necesita de un referente para fundamentar su aspecto empírico, y a su vez, el porqué la estructura se refiere a “algo en el mundo”.<sup>34</sup> Incluso, el REO debería ser capaz de construir un modelo de espaciotiempo que demuestre tanto que

<sup>33</sup> De principio, solo puede darse una relación de isomorfismo entre dos estructuras matemáticas, entre conjuntos abstractos. Algunos defensores del REO han tratado de solventar esta objeción planteando la idea de “estructura compartida” (French 2014) en términos de que el isomorfismo no es entre una realidad física y una matemática, sino entre una estructura abstracta (matemática) y otra que es posible construir a partir de los inputs de la realidad física. Lo que en este problema está en juego es la distinción entre “presentar un objeto” y “representar un objeto”, que en las estructuras matemáticas dicha distinción se disuelve; y el cómo es que las estructuras matemáticas representan y se “engarzan” con la realidad de los fenómenos.

<sup>34</sup> En cierto sentido, los partidarios del REO han pretendido atender este problema retomando el concepto de “estructura compartida”, explicado por Brading y Landry (2006) en términos de distinguir entre presentación y *representación* de algo. En física, presentar un objeto no es lo mismo que representarlo; en matemáticas, parece no haber una distinción, pues presentar un objeto es lo mismo que representarlo. En las “estructuras físicas” está presente su carácter modal (causal), en las estructuras matemáticas no, de aquí, una “estructuras compartidas”, las cuales son estructuras parciales que relacionan datos, modelos, etc., y que precisamente “presentan” los objetos físicos, siendo las estructuras matemáticas las que “representan” a dichos objetos. Véase nota 29.

este representa globalmente el universo, como que ha sido construido sin apelar a condiciones iniciales (véase los argumentos de Jones presentados arriba).

Con todo lo anterior, supongamos un modelo de espaciotiempo, llamémosle  $M_1$ , en una estructura matemática  $C$ ; y denominemos a otro modelo  $M_2$ , en una estructura matemática  $D$ . En ambos modelos debe haber una equivalencia entre los objetos tensoriales  $\langle g_{\mu\nu}, T_{\mu\nu} \rangle$ , definidos en una variedad topológica y geométrica  $M$ , y otros objetos y relaciones entre estos, con los respectivos objetos definidos en cada estructura matemática. Ahora bien, si hay un isomorfismo, entre  $M$  y las estructuras  $C$  y  $D$ , entonces, debe haber un isomorfismo entre los modelos  $M_1$  y  $M_2$ , respectivamente. Sin embargo, también debe entenderse que la realidad, en sentido físico, que proyecta el modelo  $M_1$ , llamémosle  $R_{M_1}$ , debe ser “isomórfica” a la realidad  $R_{M_2}$  que proyecta el modelo  $M_2$ .<sup>35</sup> Desde el punto de vista lógico-matemático se esperaría que sí hay tal “isomorfismo”, aunque eso implicaría enfrascarse en encontrar una prueba de ello. Sin embargo, ¿puede considerarse que es así en todas las estructuras matemáticas que trata Bain? Como se identificó líneas arriba, esto no parece ser así, pues el mismo autor acepta las limitaciones de su tratamiento para el caso de la teoría twistor. Además, resultan de poca relevancia las formulaciones de la TGR en álgebras de Einstein fuera del estudio de las singularidades. Todo esto permite cuestionar la realidad física, en los sentidos global y empírico que podrían proyectar los modelos “no sustantivos” de la TGR, como los tratados por Bain. Así, creo haber dado algunos argumentos suficientes contra el REO de Bain y haber tratado implícitamente algunos de los puntos de la sección 2.3.

Darle sentido óntico a las estructuras matemáticas, específicamente a la “estructura matemática espaciotiempo”, como es el caso de uno de los argumentos básicos del REO, es disolver lo físico en lo matemático, ¿qué queda aquí, ontológicamente hablando, respecto al espaciotiempo? Queda un mero platonismo. Quizá, un marco ontológico más atractivo para el realismo sobre el espaciotiempo podría encaminarse

<sup>35</sup> Varias de las consecuencias de esta problemática tienen que ver con si puede haber isomorfismos entre conjuntos con distinta cardinalidad (véase nota 16) y con el problema, quizá más amplio, de la representación en ciencia.

a considerar disolver lo matemático en lo físico, a la manera de los trabajos de László E. Szabó (2017), en lo que el autor llama “psycho-formalism interpretation of mathematics”, que parte del supuesto de si el fisicalismo es cierto (en un sentido fuerte: la doctrina de que todo lo que existe es material), entonces los hechos lógico-matemáticos deben ser necesarios para los hechos físicos del mundo.

## 4.2 Una crítica al reo y su metafísica de estructuras

En el corazón del REO vinculado a la física moderna se inserta la reflexión de James Ladyman et ál. (2007). Los autores claman por una metafísica de las estructuras, que por ejemplo es ilustrada en la TGR por la estructura matemática del espaciotiempo, entendida como entidad física. La primacía ontológica la tendrían no los puntos y regiones, tampoco los campos o la materia, sino la estructura relacional, de carácter matemático. De esto, uno de los argumentos fuertes resulta ser:

El aspecto físico de la estructura (espaciotiempo) está dado por su carácter modal (causal), el cual está ausente en las estructuras matemáticas.

¿Una entidad, digamos inicialmente de carácter matemático, puede en sí misma poseer un carácter causal? El carácter causal, ya sea considerar al espaciotiempo como la variedad diferenciable o como el campo métrico o como ambos:  $M + g_{\mu\nu}$  (véase sección 2), solo tiene sentido una vez que se establece la conexión entre la “estructura relacional espaciotiempo y el mundo”. Por ejemplo, Rudolp Carnap (1922) y otros positivistas lógicos distinguían, en el contexto de la TGR, entre “geometría matemática y geometría física”. La primera no tiene ningún referente empírico, no está referida a ningún aspecto cualitativo del mundo, además de ser causalmente inerte (Cao 2003); la segunda, que corresponde precisamente al tipo de geometría

<sup>36</sup> Específicamente, estamos hablando aquí del tipo de geometría que fundamenta una métrica específica para resolver las ecuaciones de campo de Einstein (véase sección 2) y que permite encontrar un modelo de espaciotiempo a partir de ciertas condiciones iniciales.

de la TGR, tiene un carácter empírico, se refiere a “algo en el mundo”, toma referentes (condiciones iniciales) y tiene, en cierto sentido, un carácter causal.<sup>36</sup> Pero entonces, ¿a qué se refiere la estructura espaciotiempo sin relatas de la que habla el REO? Para Ladyman et ál. (2007), la interpretación clásica de la ontología de la TGR, referida al espaciotiempo, está dada por el conjunto de puntos de la variedad diferenciable  $M$  (Wüthrich 2009), de aquí que, si puede mostrarse que los puntos espaciotemporales no poseen hecceidad (identidad, individualidad, o como los autores llaman “primitive thisness”), entonces puede considerarse que el espaciotiempo corresponde a una estructura relacional sin relatas. Así, para los autores, los puntos espaciotemporales no cuentan con propiedades intrínsecas, más bien, externas, y son relacionales, por lo que estos solo tienen sentido respecto a su “ubicación en la estructura relacional”.

Cabe señalar que una propiedad “trivial” intrínseca de un objeto es la existencia. Si un punto espaciotemporal no existe, puesto que su carácter relacional ejemplifica un aspecto cualitativo, no primitivo de estos, entonces se afirmaría que carece de identidad; si es así, ¿cuál sería la función de un punto espaciotiempo en la estructura? Asimismo, ¿cómo se sustenta el aspecto empírico de cualquier teoría en términos de verificar que las entidades que postula existen? A partir de establecer una correlación entre un conjunto de elementos –teoría, aparatos, cognición, etc. (véase Will 1993, para el caso específico de la TGR)– y los “objetos”, que según el REO no existen. ¿Tiene sentido verificar que “algo está ahí” y a su vez, negar que “está ahí”? Para el caso de los puntos espaciotemporales, estos podrían concebirse como “etiquetas” de objetos o eventos, y si bien –supongamos que el REO tiene razón– lo que “etiquetan dichos puntos quizá no existe”, o en un sentido, resulte indistinguible cada etiqueta,<sup>37</sup> aun así: ¿cómo distinguir el carácter modal de la estructura física espaciotiempo de otra

<sup>36</sup> En cierta tradición filosófica, se concibe que un ‘individuo’ que tiene más o menos bien definidos su localización espacial y temporal, puede considerarse un “objeto físico”, y a su vez, se diría que posee identidad. De aquí surge el problema de cómo dicho objeto puede distinguirse de otro que posee los mismo atributos o propiedades, o casi todos. Si un punto espaciotemporal ‘etiqueta’ a un objeto, ¿cómo puede distinguirse de otro punto que ‘etiqueta’ a un objeto que comparte las mismas propiedades? Parte del problema anterior es del que el REO se vale para considerar que los puntos-espaciotemporales, como los objetos, no poseen propiedades intrínsecas.

estructura matemática que la representa, cuando se ha postulado “implícitamente” un isomorfismo entre ambas estructuras, que de principio son meramente matemáticas<sup>38</sup>? Si se acepta un isomorfismo, se dice que los conjuntos, estructuras, etc., poseen la propiedad de identidad. Asimismo, en el marco de la TGR, los puntos espaciotemporales pueden distinguirse unos de otros, en cierto sentido, en términos de “a qué objeto etiqueta cada uno”, sin embargo, estructuralmente puede que sean en sí mismos indistinguibles, puesto que para el REO del espaciotiempo todos los puntos espaciotemporales comparten las mismas propiedades, por algo son indistinguibles y no poseen “individualidad”; ellos sobrevienen en propiedades relacionales. El punto específico que podría jugar a favor del REO es que el espaciotiempo, como estructura matemática, funciona muy bien para afirmar solo propiedades relacionales de los puntos, sin necesidad de apelar a su individualidad; aunque cuando se le dota de un sentido físico, la noción de objeto, y su “etiqueta”, resulta relevante. Cuando se habla de que las estructuras sustentan aspectos relacionales de una estructura real, que no sobreviene a aspectos intrínsecos de objetos, sino de “patrones reales”, ¿los relata son solo “aquello que representan las etiquetas”?, y por tanto, se dice que no tendrían aspectos intrínsecos puesto que lo único que se conoce son propiedades extrínsecas, relacionales, instanciadas por las estructuras. Entonces, ¿cómo puede haber estructuras sin relatas en una estructura (espaciotiempo) que por definición es considerada una “estructura física”, de carácter modal, esto es, causal? De nuevo, considero que independientemente de que se defina que las propiedades extrínsecas sean relacionales y estas instancian estructuras, aun así hay cierta suposición de que “existe algo distinto a las estructuras”, si no fuera así, ¿cómo puede sustentarse el aspecto modal (causal) de la estructura? Siempre y cuando se tomen condiciones iniciales que permitan encontrar modelos de espaciotiempo, y en términos generales, dichas condiciones apelan a relatas, esto es, objetos, eventos, etc., de carácter físico,

<sup>38</sup> Como se ha mencionado (véanse notas 32 y 33), los defensores del REO creen solventar esta problemática a partir del concepto de “estructura compartida”, sin embargo, sus argumentos no resultan contundentes, sobre todo debido a que tienden a confundir entre presentar y representar un objeto.

con propiedades intrínsecas. Curiosamente, en el REO se niega la existencia de algo (los objetos) que soporta la estructura, esto último lo que, según, es lo único que existe. Resulta así ser incapaz de sostener el argumento de que “las estructuras son lo único que hay” sin tener que comprometerse con la existencia de *objetos*, de *algo* más que la mera estructura.

¿La descripción de los fenómenos propios de la TGR en términos de objetos puede ser sustituida por una descripción en términos estructurales, de propiedades relacionales? Esto tiene que ver con la distinción entre un “objeto matemático” y un “objeto físico”, ¿el espaciotiempo, como estructura, es una “representación” de un objeto físico o de un objeto matemático? Resultan pertinentes aquí las palabras de van Fraassen: “¿cómo puede una entidad abstracta, como un espacio matemático, representar algo que no es abstracto, algo en la naturaleza?” (2006 537). Lo anterior tendría que ser explicado por el REO en términos de qué es lo que representa una estructura matemática respecto al mundo. Como Becker Arenhart y Bueno mencionan:

(i) Los realistas acerca de la estructura de las teorías deben ser realistas acerca de las partes matemáticas de estas teorías, tal que no es posible separar su contenido matemático de su contenido nominalista. El contenido matemático se refiere a objetos matemáticos, relaciones y funciones; el contenido nominalista no. Por tanto, (ii) si la teoría de conjuntos es usada para caracterizar las estructuras matemáticas en cuestión, conjuntos —como entidades abstractas— serán de este modo incluidas como parte de los compromisos realistas (2015 115).

Los autores se refieren al hecho de que asumir tales compromisos implica aceptar el carácter “indispensable” de las matemáticas en ciencia y un compromiso ontológico respecto a los objetos matemáticos. Esto es darles ya implícitamente un sentido óntico. Cabe señalar que el aspecto nominalista<sup>39</sup> de las teorías no implica

<sup>38</sup> Específicamente se ha de entender por *contenido nominalista* el contenido de las teorías en términos de postular entidades particulares.



un compromiso con sus aspectos matemáticos. El punto estriba en que el REO, al afirmar que el espaciotiempo es una estructura real encarnada en el mundo, cuyo carácter es matemático, está de una u otra forma asumiendo un compromiso con la existencia de un objeto matemático: la estructura relacional espaciotiempo. Y de aquí afirma también que dicha estructura es independiente de nuestras percepciones y estructuras mentales, pero asimismo, al darle dicho sentido óntico, abre de nuevo la puerta hacia el platonismo. Desde el “contenido nominalista” de una teoría física como la TGR se plantearía la cuestión: ¿dónde existe el objeto matemático, la estructura espaciotiempo? Con lo anterior, deberíamos preguntarnos: ¿sobre qué clase de estructura, en cuanto a la naturaleza de ésta, es realista el REO del espaciotiempo?

En este punto, respecto a la naturaleza de las estructuras que el REO plantea, Becker Arenhart y Bueno (2015) señalan dos posibilidades: 1) el REO podría tomar a las estructuras como primitivas y proclamar una nueva metafísica o 2) abandonar las categorías de la metafísica ordinaria (existencia, identidad, individualidad, etc.), incluyendo su conexión con el sentido común, y desarrollar una nueva metafísica con nuevas conexiones. Ambos aspectos resultan problemáticos y todavía no resueltos por el REO, incluyendo ciertos otros que ya hemos tratado (sección 4.1 y presente). Los partidarios del REO aún no ofrecen un conjunto de categorías que sustenten una “metafísica de estructuras”, que sería decantarse por el punto 2.<sup>40</sup> ¿Las estructuras poseen identidad? Desde la teoría de conjuntos, que apoya el aspecto matemático del REO, la identidad de una estructura está dada por sus objetos y las relaciones entre estos. Esto es: “La identidad de la estructura emerge de la identidad de sus objetos y

<sup>40</sup> Bruno Borge (2017), avanza en tratar de establecer un marco adecuado para el REO, que permita caracterizar lo que sería un “objeto físico”. El autor afirma: “una entidad es física si y solo si (i) es investigada, de modo al menos aproximado, por la física fundamental, y (ii) es, o puede argumentarse convincentemente que resulta, compatible con intuiciones filosóficas” (2017 94). No es el lugar para discutir las ideas del autor, sin embargo, cabe señalar que para el caso de la TGR, 1) ¿qué tipo de entidades son las que esta teoría investiga?: fenómenos cósmicos, distribución de materia, campos gravitacionales, curvatura del espaciotiempo, agujeros negros...; y 2) ¿resultan compatibles dichas entidades con intuiciones filosóficas? La respuesta a la última cuestión es más que evidente, entonces, ¿dónde quedan las estructuras postuladas por el REO?

sus relaciones”. Desde el punto de vista matemático, presentar la estructura es también presentar el tipo de objetos que la conforman.

Ahora bien, ¿el conocimiento de los eventos solo puede darse en aspectos estructurales, que son de carácter modal (causal)? Según los defensores del REO (French & Ladyman 2003; Ladyman et ál. 2007), el carácter modal está ausente en las estructuras matemáticas, no en las físicas, sin embargo, si entendemos la estructura matemática que define al espaciotiempo como la variedad diferenciable  $M$ , ¿dónde está su aspecto modal, pues resulta una entidad meramente matemática<sup>41</sup>? Si entendemos que el espaciotiempo es el campo gravitacional, ya hay contenido físico, pero asimismo, está presente su aspecto estructural-matemático, de carácter geométrico, y para algunos autores, intrínseco: “La relatividad general se desarrolló como una teoría de la gravedad que incorpora la explicación cualitativa de la estructura del espaciotiempo que se encuentra en la relatividad especial” (Maudlin 2014 198). Esta teoría le atribuye una estructura geométrica intrínseca y objetiva al espaciotiempo y “la distribución de la materia influye en la geometría del espaciotiempo, pero la distribución de la materia no determina la geometría del espaciotiempo” (Maudlin 2014 198). De lo anterior, ¿cuál interpretación del espaciotiempo resulta más factible, la de entenderlo como “contenedor” (solo la variedad diferenciable), como el “campo gravitacional”, o como ambos? ¿Qué tipo de objeto es el espaciotiempo? Hasta aquí, se pueden distinguir las siguientes respuestas:

- El “contenedor” donde se llevan a cabo los fenómenos, el escenario en que suceden las cosas. Un “continuo físico”. Dicho “contenedor” es ontológicamente independiente de los campos y materia (sección 2.1).

<sup>41</sup> En ciertas interpretaciones de la TGR, se considera que en dicha teoría, respecto a la estructura dinámica y geométrica del espaciotiempo, el aspecto causal deja de tener sentido. ¿Cuál es la causa de que el espaciotiempo se curve?, ¿la presencia de materia?, pero si es así: ¿cómo interactúa la materia con el espaciotiempo, si se considera que este es meramente geométrico? De esto último es que se sustentan especulaciones sobre el aspecto causal, presente o no en la TGR, específicamente respecto a la naturaleza del espaciotiempo.

- El campo gravitacional, un “objeto” cuya representación es matemática. No habría así tal “contenedor”, solo materia y campos (sección 2.2).
- Una estructura matemática encarnada en el mundo. Dicha estructura sería de carácter relacional y ontológicamente fundamental, materia y campos solo están sustentados por sus aspectos relacionales (sección 3 y presente).

Entonces, ¿cuál de estas alternativas resulta más coherente con una postura de realismo científico?

Tomando en cuenta lo anterior, surgen cuestiones como: ¿qué es un *objeto* físico?,<sup>42</sup> ¿el espaciotiempo corresponde, desde la visión del REO, a un tipo distinto de objeto físico del que las teorías clásicas han postulado? En su nueva “metafísica de estructuras”, el REO cree haber dado respuesta a dichas cuestiones, sin embargo, considero que su respuesta dista de ser satisfactoria. Una de las razones es que puede interpretarse la TGR como una “teoría de campos”, donde la preeminencia la tendría el campo gravitacional por sobre la variedad diferenciable, pero de aquí resulta prácticamente imposible separarse de la idea de que hay materia, pues en la TGR precisamente “la presencia de materia influye sobre la estructura del espaciotiempo”. En términos del contenido de la TGR, ¿es una teoría que solo habla de estructuras o de materia y campos, o de todos estos aspectos? El REO tiene que explicar adecuadamente por qué su “metafísica de estructuras” debe llevarnos a abandonar una ontología de objetos físicos. El REO de autores como Ladyman et ál. (2007) está inspirado en la física moderna, sobre todo en los aspectos fundamentales de la mecánica cuántica,<sup>43</sup>

---

<sup>42</sup> Toda teoría física asume un compromiso implícito con el tipo de objetos que postula. Resulta curioso el caso de la mecánica cuántica, en la que dicha teoría acepta la existencia de objetos individuales como no individuales. Sin embargo, eso no invalida ni sus fundamentos, ni su carácter empírico.

<sup>43</sup> Según los defensores del REO, la mecánica cuántica acepta el considerar las partículas como a) individuos (con condiciones de identidad y atributos propios) y b) no individuos (su identidad ni sus atributos están definidos). Lo anterior para una postura realista resulta insostenible, por lo que tales defensores apuestan por una “metafísica de estructuras”, extensible al caso de la TGR.

donde ya no puede hablarse categóricamente de “individuos”, de aquí que, como se ha visto, para el caso del espaciotiempo, los “individuos” serían los puntos espaciotemporales. Para los autores, el espaciotiempo tiene una existencia objetiva, pero no como substancia, sino como estructura. Sin embargo, al suponer, por ejemplo, una interpretación de que el espaciotiempo es el campo gravitacional, se inserta la idea de que este último corresponde a un cierto tipo de objeto con un carácter no estructural,<sup>44</sup> puesto que es una especie de “individuo”, que posee identidad, y no necesariamente puede entenderse como “una estructura ejemplificada”. Por tanto, si niega el substancialismo, el REO debe aceptar un cierto tipo de relacionismo,<sup>45</sup> al que le resulta imposible negar la existencia de materia y campos. Pero si niega el relacionismo, debe enfrentar aspectos sustanciales de la teoría que fundamentan la existencia de los puntos espaciotemporales, como las soluciones de las ecuaciones de Einstein en el vacío, siendo una de estas el espacio de Minkowski.

Finalmente, si las estructuras son lo único que hay, como la estructura matemática espaciotiempo, ¿no se está cayendo en una petición de principio dado que se supone que la “estructura de lo físico es matemática”?

Resulta difícil agotar todas las objeciones al REO, sobre todo en su versión dada por Ladyman et ál. (2007), en donde los autores pretenden sustentar una metafísica de las estructuras inspirada por los hallazgos de la física moderna. Sin embargo, he querido traer a colación algunos inconvenientes que estos y otros simpatizantes del REO tendrían que afrontar, específicamente para el caso del problema del realismo sobre el espaciotiempo, en el marco de la TGR. El REO tendría, a su vez, que responder la cuestión: ¿cómo podría predicarse la existencia física de algo que una teoría postula, cuando en primera instancia se afirma que corresponde a algo no físico, a una estructura matemática?

<sup>44</sup> Para este tipo de interpretación, puede consultarse Dorato (2000, 2008).

<sup>45</sup> De nuevo, a este tenor, puede verse el trabajo de Mauro Dorato (2008).

## 5. Conclusiones

Para concluir, quisiera remitirme brevemente a los nueve puntos señalados al final de la sección 2, a los cuales a mi modo de ver, gran parte de los argumentos del REO todavía no logran darles respuesta.

- Respecto a los puntos 1 y 2 de la sección 2.3, por un lado, el REO considera que el espaciotiempo existe como estructura matemática, pero, por otro, debe negar la existencia de los puntos espaciotemporales. Entonces, ¿logra saldar alguno de los inconvenientes substancialistas? Si existe como entidad matemática, hay un platonismo que hace extensivo el supuesto de que los puntos espaciotemporales existen.
- De acuerdo al punto 3, un dilema para el relacionismo estriba en que diversas soluciones de las ecuaciones de campo en el vacío permiten fundamentar el carácter substancialista del espaciotiempo, ya que una de estas soluciones es el espaciotiempo de Minkowski. De aquí, ¿cómo respondería el REO a esto, siendo que fundamenta un carácter sustantivo del espaciotiempo?, ni siquiera diversas respuestas al “argumento del agujero”<sup>46</sup> (respecto al substancialismo) sustentan un REO del espaciotiempo.
- Los puntos de 4 a 9 fueron tratados implícitamente en la sección 4. Por ejemplo, con relación a los argumentos de Bain, identifiqué ciertos problemas formales respecto a isomorfismos y cardinalidad entre conjuntos. Todavía está por resolverse el marco formal adecuado que dé sustento al REO. Los intentos de Bain desde la teoría de conjuntos, las transformaciones continuas, la teoría de categorías, etc., siguen sin ser contundentes. Vincent Lam y Christian Wüthrich (2015) tomaron para sí el caso de Bain (2014) respecto a la reformulación de las teorías fundamentales de la física, en términos de la teoría de categorías como

---

<sup>46</sup> A este tenor, pueden verse Earman y Norton (1987); Nerlich (1994).

fundamento de los compromisos del REO. Estos autores mostraron que la teoría de categorías no es un mejor marco para el REO que la teoría de conjuntos; también que la aplicación de la teoría de categorías como herramienta, para el marco formal de la teoría cuántica de campos y la relatividad general en las álgebras de Einstein (similarmente al caso de Bain), no es una garantía de que la descripción de estas teorías en términos de estructuras esté libre de apelar a objetos. Asimismo, en la respuesta al REO de Ladyman et ál. (2007), pude identificar algunas de las carencias de la “metafísica de estructuras”, aplicada al caso de concebir el espaciotiempo como una estructura matemática, que a su vez niega la existencia de los puntos espaciotemporales. En su caracterización del espaciotiempo como una “estructura física de carácter modal”, los autores no logran evitar las consecuencias de, por un lado, considerar dicha estructura como matemática, y por el otro, de afirmar que “es una estructura física”.

Un realista estructural niega el substancialismo del espaciotiempo, ya que no lo concibe como una substancia física, más bien como una estructura matemática relacional; pero el REO niega también el relacionismo, pues afirma que no existen materia y campos, solo la “estructura encarnada en el mundo”. Como pudo verse, en su concepción del espaciotiempo, el REO no logra dar respuesta a varios de los inconvenientes todavía no resueltos por substancialistas y relacionistas. ¿Puede, por tanto, ser aceptada como una postura realista legítima? El espaciotiempo es una entidad postulada por una teoría física, y de una u otra forma, si se desea ser realista con la teoría, se debe aceptar la existencia de dicha entidad, pero, ¿qué clase de objeto es? Aun así, lo más seguro es que el problema sobre cuál es su estatus ontológico aún siga abierto. El espaciotiempo quizá sí exista, pero ¿existe como entidad matemática, como estructura, como un ‘continuo físico’?

## Trabajos citados

- Allori, Valia. "Primitive Ontology and the Structure of Fundamental Physical Theories". *The Wave Function. Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics*. Eds. Alyssa Ney y David Z. Albert. New York: Oxford University Press, 2013. 58-75.
- Bain, Jonathan. "Spacetime Structuralism". *The Ontology of Spacetime*. Ed. Dennis Dieks. The Netherlands: Elsevier, 2006. 37-65.
- \_\_\_\_\_. "Category-theoretic Structure and Radical Ontic Structural Realism". *Synthese* 190 (2013): 1621-1635. <<https://doi.org/10.1007/s11229-011-9896-6>>.
- Becker Arenhart, Jonas R. y Bueno, Otávio. "Structural Realism and the Nature of Structure". *Euro. Jnl. Phil. Sci.* 5 (2015): 111-139.
- Borge, Bruno. "¿Qué es el realismo estructural óntico?: una aproximación al debate actual sobre el realismo científico". *Revista Colombiana de Filosofía de la Ciencia* 13.27 (2013): 149-175. <<https://doi.org/10.18270/rcfc.v13i27.1636>>.
- \_\_\_\_\_. "Realismo estructural óntico y estructuras físicas". *Revista Internacional de Filosofía Campinas* 4.2 (2017): 71-97. <<https://doi.org/10.1590/0100-6045.2017.v40n2.bb>>.
- Brading, Katherine y Elena Castellani, eds. *Symmetries in Physics. Philosophical Reflections*. New York: Cambridge University Press, 2003.
- Brading, Katherine y Landry, Elaine. "Scientific Structuralism: Presentation and Representation". *Philosophy of Science* 73 (2006): 571-581.
- Bueno, Octavio. "Structural Empiricism, Again". *Scientific Structuralism*. Eds. P. Bokulich y A. Bokulich. Springer Science+Business Media B.V, 2010. <[https://doi.org/10.1007/978-90-481-9597-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9597-8_5)>.
- Butterfield, Jeremy. "The Hole Truth". *British Journal for the Philosophy of Science* 40.1 (1989): 1-28.
- Calvo Vélez, David. "Crítica del isomorfismo de los modelos estructuralistas". *Teorema* 24.3 (2006): 57-72.

- Carnap, Rudolf. "Der Raum. Ein Beitrag zur Wissenschaftstheorie". *Kant Studien Ergänzungshefte* 56 (1922).
- Cao, Tian Yu. "Can We Dissolve Physical Entities into Mathematical Structures?" *Synthese* 136.1 (2003): 57-71.
- Chakravartty, Anja. "The Structuralist Conception of Objects". *Philosophy of Science* 70.5 (2003): 867-878.
- Dieks, Dennis, ed. *The Ontology of Spacetime*. The Netherlands: Elsevier, 2006.
- \_\_\_\_\_. *The Ontology of Spacetime II*. The Netherlands: Elsevier, 2008.
- DiSalle, Robert. *Understanding Space-Time*. New York: Cambridge University Press, 2008.
- Dorato, Mauro. "Substantivalism, Relationism and Structural Spacetime Realism". *Foundations of Physics* 30 (2000): 1605-1628.
- \_\_\_\_\_. "Is Structural Spacetime Realism Relationism in Disguise? The Supererogatory Nature of the Substantivalism/Relationism Debate". *The Ontology of Spacetime II*. Ed. Dennis Dieks. The Netherlands: Elsevier, 2008. 17-38.
- Earman, John. *World enough and Space-Time. Absolute versus Relational Theories of Space and Time*. Cambridge, MA: The MIT Press, 1989.
- \_\_\_\_\_. "The Implications of General Covariance for the Ontology and Ideology of Spacetime". *The Ontology of Spacetime*. Ed. Dennis Dieks. The Netherlands: Elsevier, 2006. 3-23.
- Earman, John y John Norton. "What Price Spacetime Substantivalism? The Hole Argument". *The British Journal for the Philosophy of Science* 4.38 (1987): 515.
- Einstein, Albert. "Fundamentos de la teoría de la relatividad general". *Einstein: obra esencial*. Barcelona: Crítica, 2005.
- Esfeld, Michael y Vincent Lam. "Moderate Structural Realism about Spacetime". *Synthese* 160 (2008): 27-46.
- French, Steven. *The Structure of the World: Metaphysics and Representation*. Oxford: Oxford University Press, 2014.
- French, Steven y James Ladyman. "Remodeling Structural Realism: Quantum Physics and the Metaphysics of Structure". *Synthese* 136.1 (2003): 31-56.



- Friedman, Michael. *Foundations of Space-Time Theories. Relativistic Physics and Philosophy of Science*. Princeton: Princeton University Press, 1987.
- Geroch, R. "Einstein algebras". *Communications in Mathematical Physics* 26.1 (1972): 271-275.
- Hacyan, Shahen. "Geometry as an Object of Experience: Kant and the Missed Debate between Poincaré and Einstein". *European Journal of Physics* 30.1 (2007): 337-350.
- Hacking, Ian. *Representar e intervenir*. México: Paidós, 1996.
- Heller, Michael. "Einstein Algebras and General Relativity". *International Journal of Theoretical Physics* 31.2 (1992): 277-288.
- Hoefer, Carl. "The Metaphysics of Spacetime Substantivalism". *Journal of Philosophy* 93.1 (1996): 5-27.
- Horwich, Paul. "Three Forms of Realism". *Synthese* 51.1 (1982): 181-201.
- Huggett, Nick. *Space from Zeno to Einstein*. United States of America: The MIT Press, 1999.
- Jones, Roger. "Realism about what?" *Philosophy of Science* 58 (1991): 185-202.
- Ladyman, James. "What is Structural Realism?" *Studies in History and Philosophy of Science* 29 (1998): 409-424.
- \_\_\_\_\_. "On the Identity and Diversity of Objects in a Structure". *Proceedings of the Aristotelian Society* 81 (2007): 45-61.
- Ladyman, James, et ál. *Every Thing Must Go. Metaphysics Naturalized*. New York: Oxford University Press, 2007.
- Lam, Vincent y Christian Wüthrich. "No Categorical Support for Radical Ontic Structural Realism". *British Journal of Philosophy of Science* 66 (2015): 605-634.
- Madrid-Casado, C. "Do Mathematical Models Represent the World? The Case of Quantum Mathematical Models". *Nature and Life. Philosophical Essays and Physics and Biology*. Ed. J. L. González Recio. Hildesheim: Georg Olms Verlag, 2009. 67-89.
- Maudlin, Tim. "The Essence of Space-Time". *Proceedings of the Philosophy of Science Association Meetings*. Vol. 2. Comps. A. Fine y J. Leplin. East Lansing: Philosophy of Science Association, 1989.

- \_\_\_\_\_. *Filosofía de la física I. Espacio y tiempo*. México: FCE, 2014.
- Montesinos, Merced. "El problema del tiempo en la relatividad general". *Revista Mexicana de Física* 53.2 (2007): 68-74.
- Nerlich, Graham. "Holes in the Hole Argument". *What Spacetime Explains?* New York: Cambridge University Press, 1994. 206-224.
- Poincaré, Henri. *Science and Hypothesis*. New York: Dover Publications, Inc., 1952.
- Pooley, Oliver. "Substantivalist and Relationalist Approaches to Spacetime". *Philosophy of Physics*. Ed. Robert Batterman. New York: Oxford University Press, 2013. 522-586.
- Psillos, Stathis. "Is Structural Realism the Best of Both Worlds?" *Dialectica* 49 (1995): 15-46.
- \_\_\_\_\_. "Is Structural Realism Possible?" *Philosophy of Science* 68 (2001): 513-524.
- Rickles, Dean. *Symmetry, Structure and Spacetime*. The Netherlands: Elsevier, 2008.
- Redhead, Michael. "The Interpretation of Gauge Symmetry". *Symmetries in Physics Philosophical Reflections*. Eds. K. Brading y E. Castellani. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 124-139.
- Rivadulla, Andrés. "Two Dogmas of Structural Realism. A Confirmation of Philosophical Death Foretold". *Crítica. Revista Hispanoamericana de Filosofía* 42.124 (2010): 3-29.
- Romero, Gustavo E. "The Ontology of General Relativity". *General Relativity and Gravitation*. Eds. M. Novello y S. E. Pérez Bergliaffa. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. 1-15.
- Rosenstock, Sarita, et ál. "On Einstein Algebras and Relativistic Spacetimes". *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 52 (2015): 309-316.
- Rovelli, Carlo. "The Disappearance of Space and Time". *The Ontology of Spacetime*. Ed. Dennis Dieks. The Netherlands: Elsevier, 2008. 25-36.
- Rynasiewicz, Robert. "Absolute versus Relational Space-Time: An Outmoded Debate?" *Journal of Philosophy* 93.6 (1996): 279-306.
- Sklar, Lawrence. *Space, Time and Spacetime*. Berkeley: University of California Press, 1977.

- Sneed, John. *The Logical Structure of Mathematical Physics*. Dordrecht: D. Reidel, 1971.
- Stachel, John. "The Meaning of General Covariance". *Philosophical Problems of the Internal and External Worlds: Essays of the Philosophy of Adolf Grünbaum*. Eds. John Earman et ál. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 1993. 129-162.
- Szabó, Lázló E. "Meaning, Truth, and Physics". *Making it Formally Explicit*. European Studies in Philosophy of Science 6. Eds. G. Hofer-Szabó y L. Wronski. Dordrecht: Springer International Publishing, 2017. 1-16.
- Tegmark, M. "The Mathematical Universe". *Foundations of Physics* 38 (2008): 101– 150.
- Utiyama, Ruy. "Invariant Theoretical Interpretation of Interaction". *Physical Review* 5.101 (1956): 1597-1607. <<https://doi.org/10.1103/PhysRev.101.1597>>.
- VanFraassen, B. C. "Representation: The Problem for Structuralism". *Philosophy of Science* 73.5 (2006): 536-547.
- Wald, Robert M. *General Relativity*. Chicago: The University of Chicago Press, 1984.
- Will, C. M. *Theory and Experiment in Gravitational Physics*. New York: Cambridge University Press, 1993.
- Worral, John. "Structural Realism: The Best of Both Worlds". *Dialectica* 43 (1989): 99- 124.
- Wüthrich, Christian. "Challenging the Spacetime Structuralist". *Philosophy of Science* 76 (2009): 1039-1051.