

LOMBARDI, Olimpia. Determinismo y temporalidad. In: MARTINS, R. A.; MARTINS, L. A. C., P.; SILVA, C. C.; FERREIRA, J. M. H. (eds.). *Filosofia e história da ciência no Cone Sul: 3º Encontro*. Campinas: AFHIC, 2004. Pp. 333-340. (ISBN 85-904198-1-9)

DETERMINISMO Y TEMPORALIDAD

Olimpia Lombardi *

Resumen – Durante el siglo XX, mientras se percibe un clima intelectual de creciente hostilidad hacia cualquier doctrina determinista, surge la idea de una curiosa relación de oposición entre determinismo y temporalidad. El objetivo del presente trabajo consiste en elucidar la noción de determinismo en sus diferentes acepciones –semántica, gnoseológica y ontológica– a fin de establecer sus relaciones con el concepto de tiempo. En particular, se analizarán las siguientes cuestiones: (i) la relación entre determinismo y autonomía de las ecuaciones diferenciales de evolución, (ii) la relación entre determinismo, invariancia de las ecuaciones ante la inversión temporal y homogeneidad del tiempo, (iii) la relación entre determinismo y recurrencia y, (iv) la posibilidad de determinismo con acción a distancia temporal.

Durante el siglo XX, mientras se percibe un clima intelectual de creciente hostilidad hacia cualquier doctrina determinista, surge la idea de una curiosa relación de oposición entre determinismo y temporalidad. Tal vez quien mejor expresa esta idea es Henri Bergson cuando, en *La evolución creadora*, afirma que la ciencia ha sido fecunda cada vez que ha logrado negar el tiempo, reduciendo el devenir a una eterna repetición de lo mismo: la física determinista considera los acontecimientos “en el estado abstracto, tal como serían fuera del todo viviente, es decir, en un tiempo extendido en espacio” (BERGSON, 1959, p. 784). En nuestros días, Ilya Prigogine ha revivido la doctrina bergsoniana, integrándola a los recientes resultados de la Termodinámica no-lineal; su veredicto es tan lapidario como el de Bergson:

Negar el tiempo, esto es, reducirlo al desarrollo determinista de una ley reversible, es renunciar a la posibilidad de definir una naturaleza capaz de producir seres vivos y, en particular, el hombre; es condenarse a escoger entre una filosofía anticientífica y una ciencia alienante. (PRIGOGINE & STENGERS, 1990, p. 136)

Esta negación del tiempo genera en el ser humano un profundo sentimiento de angustia y alienación, al enfrentarlo a una naturaleza que “no es más que una inmensa tautología, [...] arbitraria

* Universidad de Buenos Aires-CONICET; Buenos Aires, Argentina. E-mail: olimpiafilo@amet.com.ar

y absurda” (PRIGOGINE & STENGERS, 1990, p. 112).

Sin duda, no es necesario compartir las pesadillas de Bergson y Prigogine; muchos autores, Einstein entre ellos, han visto en el determinismo una doctrina intelectualmente satisfactoria y capaz de expresar adecuadamente la evolución de lo real. Pero la cuestión a considerar aquí es la supuesta negación del tiempo que opera la ciencia determinista. Tal “negación” sólo puede interpretarse en términos de una *espacialización* del tiempo, pero debe liberarse de toda connotación literal: carece de sentido suponer que la ciencia determinista elimina el tiempo puesto que la noción de determinismo es una noción esencialmente *dinámica*. En efecto, el predicado “determinista” se aplica:

- en su acepción semántica, a ecuaciones dinámicas que, por tanto, contienen la variable *tiempo* como variable independiente.
- en su acepción gnoseológica, al conocimiento acerca de un estado del sistema, si puede obtenerse a partir de su estado en un *instante* previo arbitrario.
- en su acepción ontológica, a un sistema sobre la base de la sucesión unívoca de sus estados posibles a través del *tiempo*.

Por lo tanto, no toda ecuación que establece una relación funcional entre variables puede ser considerada determinista o indeterminista. En particular, carece de sentido predicar determinismo de ecuaciones que no contienen la variable *t*; éste es el caso, por ejemplo, de la ley que rige la dilatación térmica de una varilla metálica, $L(T) = L(0) (1 + \alpha T)$ –donde *T* representa la temperatura, *L* la longitud y α el coeficiente de dilatación térmica–, en la cual se establece una conexión unívoca entre variables no dinámicas. Esto continúa siendo válido cuando se pasa al plano ontológico: no es pertinente considerar un sistema como determinista sobre la base de una cierta relación entre magnitudes no dinámicas o entre sus propiedades en un dado instante; éste el caso, por ejemplo, de la relación constante entre presión, volumen y temperatura de un gas en equilibrio, relación que se conserva en todo instante en que el gas permanezca en tal estado. En resumen, nada hay en la noción de determinismo que conduzca a una negación literal del tiempo; por el contrario, el concepto de tiempo resulta indispensable para su definición. Por otra parte, aún si se admitiese que la física clásica opera la espacialización de lo temporal, ello no se debería a su carácter determinista sino a un supuesto metafísico independiente acerca de la naturaleza del tiempo.

* * *

En su célebre artículo “Sobre la noción de causa”, Russell intenta depurar la caracterización laplaciana de determinismo de sus componentes gnoseológicos; para ello propone la siguiente definición:

Se dice que un sistema es *determinista* cuando, dados ciertos datos e_1, e_2, \dots, e_n del sistema correspondientes a los instantes t_1, t_2, \dots, t_n respectivamente, si E_t es el estado en cualquier instante *t*, existe una relación funcional de la forma $E_t = f(e_1, t_1, e_2, t_2, \dots, e_n, t_n)$. El sistema será *determinista en el período dado* si *t*, en la fórmula anterior, es cualquier instante dentro de tal período. [...] Si el universo, como un todo, es tal sistema, el determinismo es verdadero del universo, si no, no lo es. (RUSSELL, 1953, p. 398)

Si bien la definición russelliana parece recoger con precisión la noción de determinismo, ante un análisis más detenido revela sus inconvenientes. Matemáticamente, dado un conjunto finito de puntos, cualquiera sea su número, siempre es posible construir una ecuación que pase por ellos. Es decir, cualesquiera sean los datos e_1, e_2, \dots, e_n y el estado E_t , siempre existe una función tal que

permite obtener E_i a partir de e_1, e_2, \dots, e_n y sus respectivos instantes. Por lo tanto, cualquier sistema, sea cual sea su evolución, cumple *trivialmente* la definición russelliana de determinismo.

El propio Russell admite este inconveniente cuando afirma:

Se sigue que, teóricamente, el estado completo del universo en el instante t debe ser capaz de ser exhibido como una función de t . Por lo tanto, nuestro universo será determinista en el sentido definido antes. Pero si esto es verdad, no se agrega información alguna en establecer que es determinista. (RUSSELL, 1953, p. 401)

Frente a este problema, Russell considera dos posibles soluciones. La primera consiste en exigir que la función f sea simple; pero rápidamente descarta esta opción debido a que no existe relación directa alguna entre simplicidad y determinismo: un universo de evoluciones altamente complejas puede ser determinista. Por ello, Russell se vuelca hacia la segunda alternativa, que consiste en exigir que la función f sea *autónoma*, esto es, no sea función explícita del tiempo. Según Russell, la autonomía de f es consecuencia del llamado “principio de uniformidad de la naturaleza” según el cual: “ninguna ley científica contiene el tiempo como argumento, excepto, por supuesto, si es dada en su forma integrada, en cuyo caso puede aparecer en la fórmula el lapso de tiempo, si bien no el tiempo absoluto” (RUSSELL, 1953, p. 401).

En su comentario a Russell, John Earman sostiene que no se cumple la implicación entre ambas afirmaciones: aún con leyes autónomas, la función de Russell f puede no serlo; en sus propias palabras:

[...] aún si concedemos a Russell su «uniformidad de la naturaleza» con respecto a las leyes de movimiento, difícilmente se siga que la función de Russell no incluirá el tiempo explícitamente; incluso, si la posición cambia con el tiempo, la función de Russell difícilmente pueda evitar tener el tiempo como un argumento. (EARMAN, 1986, p. 12)

Aquí Earman parece referirse a los casos más sencillos, como el de una partícula a velocidad constante en línea recta: incluso en esta situación, la variable posicional es función explícita del tiempo:

$$x(t) = v_0 t \quad [\text{con } v_0 = \text{const.}]$$

En este caso, el estado del sistema en cualquier instante t queda definido por el par $(x(t), v(t))$, cuyos elementos pueden expresarse como:

$$\begin{aligned} x(t) &= f_1(t) = v_0 t. \\ v(t) &= f_2(t) = v_0. \end{aligned}$$

Aquí el par (f_1, f_2) cumple el papel de la función de Russell: si bien f_2 es autónoma, f_1 incluye el tiempo explícitamente, lo cual parece confirmar la posición de Earman. Sin embargo, si Earman se refiere a este tipo de casos, su argumento está desencaminado: la ecuación de movimiento $x(t) = v_0 t$ está dada en su forma integrada, es decir, es solución de la ecuación diferencial *autónoma*:

$$dx/dt = v_0$$

En tal solución intervienen los límites de integración t_0 y t_1 :

$$x = \int_0^1 v_0 dt = v_0 (t_1 - t_0) = v_0 \Delta t$$

En otras palabras, en la ecuación $x(t) = v_0 t$, la variable t no refiere al tiempo absoluto sino a un *intervalo* medido desde el instante inicial t_0 . Por lo tanto, este tipo de casos no constituye una objeción a la posición de Russell: la ley de movimiento en su forma diferencial es autónoma, pero la función de Russell también lo es puesto que las variables de estado no son funciones explícitas del tiempo sino de intervalos temporales.

El verdadero inconveniente de la propuesta de Russell reside en su posición *actualista* respecto de la definición de determinismo: el estado del sistema en un dado instante debe obtenerse a partir de los estados *efectivamente ocurridos* con anterioridad, es decir, a partir de los estados actualizados en el pasado. Pero si se adopta esta posición, la violación del requisito de uniformidad de la naturaleza no asegura el carácter indeterminista de un sistema. Considérese un cuerpo en caída libre en un campo gravitatorio, cuyo movimiento responde a la Segunda Ley de Newton y a la Ley de Gravitación Universal; supóngase, además, que la constante de gravitación universal no es en realidad constante sino que varía linealmente con el tiempo absoluto según:

$$G(t) = k t \quad \text{con } k = \text{const.}$$

En este caso, la dependencia de las variables de estado respecto del tiempo viene dada por ecuaciones de movimiento de la forma:

$$\begin{aligned} x(t) &= \alpha t^3 \\ v(t) &= \beta t^2 \end{aligned} \quad [\text{con } \alpha \text{ y } \beta \text{ constantes}]$$

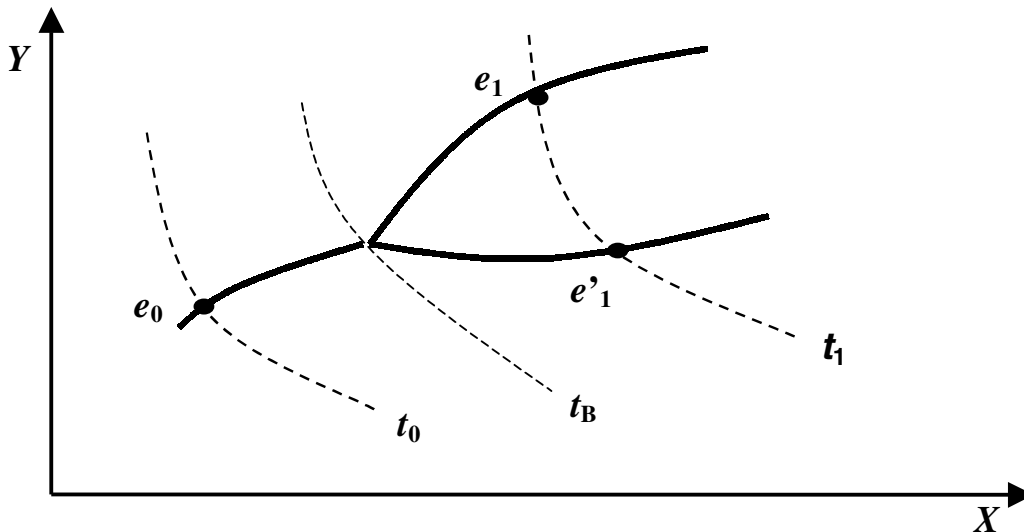


Figura 1.

Si bien la Ley de Gravitación Universal es no-autónoma, para cada valor de t , se actualiza un único estado $(x(t), v(t))$ dado por las ecuaciones de movimiento y, por tanto, es posible construir una función de Russell f que vincule de forma autónoma el estado en el instante t con los estados

efectivamente ocurridos previamente. En otras palabras, Russell confunde la autonomía de la función f con la autonomía de las leyes.

¿Cómo concebir, entonces, el indeterminismo? Consideremos un sencillo diagrama de estado donde se grafica la variable de estado Y en función de la variable de estado X . Supongamos que existe una evolución posible que, partiendo de cierto estado inicial e_0 en t_0 , se bifurca de modo tal que en un instante posterior t_1 hay dos estados e_1 y e'_1 condicionalmente posibles respecto de e_0 ; esta situación claramente indeterminista se representa como en la Figura 1.

Una situación de este tipo podría darse, por ejemplo, en el caso en que una de las variables de estado dependiera del tiempo del siguiente modo (Figura 2):

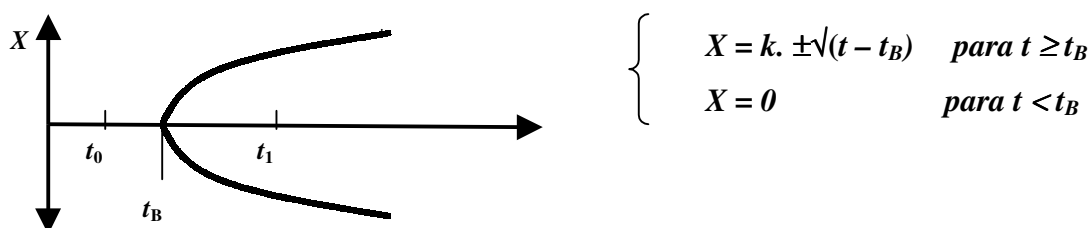


Figura 2.

Si tal evolución es irreductible, puede concluirse el carácter ontológicamente indeterminista del sistema. Pero el punto aquí es que este tipo de gráficas sólo puede obtenerse a partir de *las ecuaciones de evolución del sistema*; jamás se obtendrá, a partir de *estados efectivamente ocurridos*, una gráfica que se bifurque en dos evoluciones posibles, puesto que *en cada instante sólo puede actualizarse un único estado*; además, como fue señalado, dados los estados actualizados, siempre es posible construir una ecuación que “pase” por ellos. Esto muestra la esterilidad de cualquier intento de abordar el problema del determinismo desde una perspectiva actualista, que ignore el carácter irreductible del concepto de posibilidad implícito en las ecuaciones de evolución.

* * *

La relación entre determinismo y temporalidad puede también ser analizada en términos de ciertas simetrías temporales de las leyes naturales. Russell interpreta su principio de uniformidad de la naturaleza como un requisito de autonomía de las leyes; Herbert Feigl expresa la misma idea cuando afirma que el determinismo exige autonomía:

[...] el lugar y el tiempo en los cuales los eventos ocurren no poseen en sí mismos efecto alguno para modificar tales eventos. Matemáticamente esto puede ser expresado diciendo que las variables espacio y tiempo no figuran *explícitamente* en las funciones que expresan leyes naturales. (FEIGL, 1953, p. 12)

La autonomía de una ley equivale a su invariancia ante la traslación temporal: la ley natural L es *invariante ante la traslación temporal* sii es invariante ante la transformación $t \rightarrow t + \Delta t$. A su vez, tal

invariancia de las leyes equivale a la *homogeneidad* del tiempo: no existe origen temporal privilegiado, nada diferencia los instantes entre sí; no puede darse que un proceso físico ocurra de un modo diferente dependiendo exclusivamente del instante particular en el que ocurre. Por lo tanto, tanto Russell como Feigl asimilan implícitamente determinismo e invariancia ante la traslación temporal de las leyes naturales.

Sin embargo, la invariancia ante la traslación temporal se cumple trivialmente si L es autónoma pero puede no cumplirse si L es función explícita del tiempo: este último es el caso de la evolución de un sistema bajo las leyes de Newton modificadas de modo que $G(t) = k t$; pero, como fue señalado, tal situación no asegura el carácter indeterminista del sistema. En otras palabras, determinismo no implica invariancia ante la traslación temporal. Frente a este caso, Russell y Feigl podrían replicar que, en tanto función del tiempo, el valor de G abandona el ámbito de lo legal para pasar a formar parte de las condiciones particulares de las que depende la evolución del sistema. Pero si se elimina de las leyes toda dependencia temporal, entonces la invariancia ante la traslación temporal se convierte en una propiedad *a priori* de las leyes naturales; con ello, al asimilar autonomía y determinismo, se vacía de referente el término “indeterminista”.

* * *

Otra de las cuestiones que suelen relacionarse con el problema del determinismo es la que se refiere a la *recurrencia* o *periodicidad* de los sistemas físicos. Por ejemplo, John Stuart Mill afirma:

Creemos que el estado completo del universo en cualquier instante es consecuencia de su estado en el instante previo [...]. Y si cualquier estado particular del universo entero pudiera recurrir una segunda vez, todos los estados subsiguientes también volverían, y la historia se repetiría a sí misma periódicamente. (MILL, *A system of logic*, pp. 400-401)

Ernest Nagel expresa la misma idea de un modo aún más preciso:

Supongamos que, en el tiempo t_0 , [el sistema] S se encuentra en el estado $(v_1^0, v_2^0, v_3^0, \dots)$, que el estado de S cambia con el tiempo y que en el tiempo t_1 se encuentra en el estado $(v_1^1, v_2^1, v_3^1, \dots)$. Imaginemos ahora que S es llevado nuevamente al estado que poseía en el tiempo t_0 , que cambia nuevamente de estado por sí mismo y que después de un intervalo de tiempo $(t_1 - t_0)$ se encuentra nuevamente en el estado en el que estaba en el tiempo t_1 . Supongamos, finalmente, que S siempre se comporta de la manera indicada, para todo tiempo inicial y para todo intervalo de tiempo [...]. Estamos definiendo qué quiere decir que S es un sistema determinista relativo a una clase establecida de propiedades. (NAGEL, 1989, pp. 260-261)

Si este pasaje se interpreta como una *definición* de determinismo ontológico en términos de periodicidad, Nagel ha errado el blanco, pues el carácter determinista de un sistema no implica su recurrencia. En efecto, podría suceder que un universo determinista describiera una evolución tal que sus estados no ocurrieran más que una única vez, excluyendo así toda posible periodicidad; éste es el caso de un universo cuya única partícula se mueve en línea recta a velocidad constante en el espacio absoluto newtoniano –recuérdese que el Teorema de Recurrencia de Poincaré sólo es válido para sistemas confinados en un volumen finito–. Tal vez sería mejor pensar que Nagel se refiere a una recurrencia de tipo *condicional*: en un universo determinista, *si* en un instante t_1 el universo completo

se encontrara en un estado idéntico al que se encontraba en un instante previo t_0 , entonces su evolución se repetiría eternamente. Pero tampoco bajo esta interpretación la tesis de Nagel resulta adecuada. Considérese nuevamente el ejemplo donde $G(t) = k t$; aquí podría suceder que el universo volviera a encontrarse, en el instante t_1 , en el mismo estado en el que se encontraba en el instante previo t_0 ; no obstante, dado el diferente valor que adquiere G en ambos instantes, las evoluciones que parten de dichos instantes pueden no coincidir, eludiéndose así la recurrencia. En resumen, en contra de lo que supone Nagel, el determinismo ontológico no implica siquiera una periodicidad de carácter condicional.

* * *

Jeremy Butterfield recuerda el caso de teorías donde todos los estados pasados, tomados en conjunto, contribuyen a la determinación del estado presente y de los futuros; ejemplo de ello son las teorías que permiten calcular el estado presente mediante una integral desde $t=-\infty$ hasta el instante actual (BUTTERFIELD, 1998, p. 38). Si bien Butterfield no menciona ejemplos concretos, éste es el caso de la tensión entre las placas de un capacitor en un instante t_0 que se calcula como $V(t_0) = 1/C \int_{-\infty}^{t_0} i dt$, donde C es la capacidad del capacitor e i la corriente eléctrica. No obstante, esta alusión al pasado remoto no es más que un recurso matemático para definir el estado presente: no implica una “acción a distancia temporal”; por el contrario, los estados pasados influyen sobre el futuro pero sólo vía su influencia sobre el estado presente; en nuestro ejemplo, la integral no es más que la carga q sobre las placas en el instante t_0 . Si bien esto se cumple en general en física, no puede concluirse que una tal “acción a distancia temporal” conduciría inevitablemente al carácter indeterminista del universo físico; en efecto, aún en el caso de que todos los estados pasados contribuyeran a determinar el estado presente, seguiría vigente el determinismo en una versión ligeramente diferente de la tradicional: en lugar de aludir a la determinación del futuro por el *presente*, la nueva versión afirmaría la determinación del futuro por el *pasado*. Si bien la posibilidad de una influencia acumulativa del pasado respecto del futuro abre una interesante línea de investigación, no es éste el caso relevante para la mayoría de las teorías físicas actuales.

* * *

El aspecto dinámico del concepto de determinismo da lugar a un nuevo problema cuando se lo examina a la luz de la Teoría de la Relatividad. La noción de determinismo incluye la idea de estado del universo completo en un dado instante, de modo tal que todos los hechos que ocurren en dicho instante son simultáneos entre sí; es decir, el concepto de “universo en un dado instante” es un invariante para todo sistema de referencia. Pero con la Teoría de la Relatividad Especial la simultaneidad pasa a ser relativa a cada sistema de referencia; ¿cómo concebir, entonces, el determinismo sin simultaneidad absoluta? La estructura espacio-temporal relativista exige modificar la caracterización de determinismo ontológico, reemplazando el concepto de instante por el de “tajada de tiempo” (*time slice*) y relativizando la noción de futuro: el universo es determinista si su estado en una tajada de tiempo T_1 fija unívocamente los estados correspondientes al futuro de T_1 , para cualquier T_1 .

La situación se complica aún más en Relatividad General, pues las ecuaciones de campo de Einstein admiten como modelos espacio-tiempos de las más variadas topologías. En particular, puede darse el caso de que el espacio-tiempo se curve a lo largo de las dimensiones espaciales de modo tal que sus secciones tipo espacio (*spacelike*) se conviertan en el análogo tridimensional de una cinta de Moebius. En este caso, se dice que el espacio-tiempo es *no orientable*: la distinción entre pasado y

futuro no puede establecerse globalmente – un ejemplo clásico de espacio tiempo no orientable es el modelo elíptico de De Sitter. Pero aún en el caso de orientabilidad, la topología puede ser tal que el espacio tiempo no es foliable en hipersuperficies de simultaneidad – o no lo es unívocamente (para una jerarquía de condiciones de causalidad, cf. HAWKING, 1973) – en estos casos no es posible definir un tiempo cósmico que cumpla el papel de parámetro de evolución del universo. En consecuencia, la definición del concepto de determinismo, en tanto concepto esencialmente dinámico, se enfrenta a nuevos problemas cuando el tiempo se convierte en una dimensión geométrica más del continuo espacio-temporal.

* * *

En modo alguno se pretende aquí haber agotado el tema; sólo se ha intentado mostrar algunos aspectos de la relación entre determinismo y temporalidad: si bien se trata de un concepto esencialmente dinámico, cuando se intenta definir determinismo de un modo totalmente general en función de nociones temporales, surgen innumerables problemas que sólo pueden ser evaluados en el contexto de cada teoría particular.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERGSON, H. *L'évolution créatrice*, en *Oeuvres*. Paris: Ed. du Centenaire, 1959.
- BUTTERFIELD, J. Determinism and indeterminism. In: CRAIG, Edward (ed.). *Routledge Encyclopedia of Philosophy*. London / New York: Routledge, 1998. Vol. 3, pp. 33-39.
- EARMAN, J. *A primer on determinism*. Dordrecht: Reidel, 1986.
- FEIGL, H. Notes on causality. In: FEIGL, H.; BRODBECK, G. (eds.). *Readings in the philosophy of science*. New York: Appleton, 1953. Pp. 408-418.
- HAWKING, S. W.; ELLIS, G. F. R. *The large scale structure of space-time*. Cambridge: Cambridge University Press, 1973.
- MILL, J. S. *A system of logic*. New York: Harper and Row.
- NAGEL, E. *La estructura de la ciencia*. Barcelona: Paidós, 1989.
- PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. *La nueva alianza. Metamorfosis de la ciencia*. Madrid: Alianza editorial, 1990.
- RUSSELL, B. On the notion of cause with applications to the free-will problem. In: FEIGL, H.; BRODBECK, G. (eds.). *Readings in the philosophy of science*. New York: Appleton, 1953. Pp. 387-407.