

EL PAPEL DE LAS ANALOGÍAS EN LA CREATIVIDAD DE LOS CIENTÍFICOS: LA TEORÍA DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO DE MAXWELL COMO CASO PARADIGMÁTICO DE LA HISTORIA DE LAS CIENCIAS

José Antonio Acevedo Díaz

Consejería de Educación de la Junta de Andalucía.

Inspección de Educación. Delegación Provincial de Huelva.

E-mail: ja_acevedo@vodafone.es

RESUMEN

La metodología científica incluye aspectos como la capacidad de invención de hipótesis y modelos, la creatividad y el uso del razonamiento analógico, entre otros muchos más. El presente artículo se ocupa del papel de las analogías en el pensamiento creativo de los científicos, aplicado a un caso paradigmático de la historia de las ciencias del siglo XIX, como fue el desarrollo de la teoría del campo electromagnético de Maxwell, que daría lugar a una de las grandes síntesis de la física clásica: la de los fenómenos ópticos, eléctricos y magnéticos. Ilustrado con las palabras del principal protagonista, las de otros físicos de la época y las de historiadores de las ciencias que se han ocupado de este tema, el artículo muestra el exhaustivo uso que Maxwell hizo de las analogías y el razonamiento analógico en su intento de conseguir sus más importantes propósitos científicos.

Palabras clave: *Analogías; creatividad científica; razonamiento analógico; historia de las ciencias; electromagnetismo; Maxwell.*

INTRODUCCIÓN

Muchas personas creen en la existencia de un omnipotente método científico absoluto y universal, el cual puede aplicarse siguiendo una serie de reglas más o menos fijas. Este mito no sólo está muy extendido en la sociedad sino que también se ubica en la enseñanza de las ciencias (McComas, 1996; Fernández *et al.*, 2002). Entre otras cosas, quienes sostienen esta creencia suelen olvidar a menudo importantes rasgos característicos del trabajo científico, tales como la invención de hipótesis y modelos, la creatividad y el uso de analogías y del razonamiento analógico por parte de los científicos para favorecer y desarrollar su pensamiento, generar nuevos conceptos y conocimientos, establecer una nueva teoría... (Nersessian, 2002).

Las personas usamos analogías –comparaciones entre entidades que consideramos similares en algún sentido– en la vida cotidiana cuando queremos comunicar nuestras ideas sobre temas que nos son menos familiares; para ello solemos recurrir a otros

referentes mejor conocidos y que nos parecen semejantes al menos en los aspectos que queremos expresar. Sin embargo, en el trabajo científico las analogías suponen mucho más que una forma de hablar, pues se convierten en un potente instrumento cognitivo para el razonamiento y la explicación en ámbitos conceptuales novedosos y más abstractos (Gentner y Gentner, 1983).

El papel de las analogías en la construcción personal de nuevos conocimientos ha sido abordado desde diversas perspectivas, como la psicológica, la cognitiva y la educativa (Acevedo, 1990). En este artículo se utilizará una perspectiva epistemológica que se apoya en la historia de las ciencias, la cual es una línea de trabajo que puede ser de gran interés para la didáctica de las ciencias (Oliva, 2004b). Para ello, se acudirá al análisis de las reflexiones de los propios científicos en sus escritos públicos y privados –cartas a otros científicos, diarios y notas personales–, como suele hacerse en la historia, la filosofía y la sociología de las ciencias y también en las ciencias cognitivas cuando se aplica el método “histórico-cognitivo”¹ (Nersessian, 1992).

Diversos estudios han aludido al papel central de las analogías y las metáforas en la faceta creativa del trabajo de los científicos (p.ej., Dreistadt, 1968; Gee, 1978; Gentner y Gentner, 1983; Gentner *et al.*, 1997; Muscari, 1988; Nersessian, 1995, 2002; Oliva 2004a,b; Oliva y Acevedo, 2004). Tomando como caso paradigmático la teoría del campo electromagnético de Maxwell², este artículo se ocupará del destacado papel que representó el razonamiento analógico en su desarrollo durante el siglo XIX, cuya importancia fuera resaltada ya, al final del mismo, por el genial físico austríaco Ludwig Boltzmann en un trabajo donde reflexionaba acerca de los métodos de investigación de la física teórica (Boltzman, 1892):

“[...] No podemos reprochar a una mera analogía que cojee en algunos aspectos. Por eso se interpretaron inmediatamente las viejas teorías, como la teoría elástica de la luz, la teoría de los gases, los esquemas químicos para los anillos bencénicos, etc., nada más que como analogías mecánicas, y finalmente la filosofía generalizó las ideas de Maxwell hasta fundar una doctrina según la cual el conocimiento mismo no es otra cosa que el hallazgo de analogías. Con esto los métodos científicos fueron definidos de nuevo y la Ciencia habló nada más que mediante comparaciones.”

(p. 54 de la traducción castellana, 1986).

¹ Propuesto por Nersessian, el método “histórico-cognitivo” pretende explicar la naturaleza y el desarrollo de la ciencia siguiendo lo que, en la jerga de la filosofía de la ciencia contemporánea, se conoce como una epistemología naturalizada de la ciencia. Para ello, por un lado se parte del estudio de las prácticas científicas del pasado –o contemporáneas– y, por otro, de las investigaciones procedentes de la ciencia cognitiva sobre aspectos pertinentes de la cognición humana relacionados con esas prácticas. La dimensión histórica del método es necesaria para dar cuenta de las prácticas científicas usadas durante amplios períodos de tiempo y de cómo éstas se insertan en los contextos culturales de la época y se ven influidas por factores sociales internos y externos a la comunidad científica. La dimensión cognitiva permite incluir en el análisis realizado las capacidades y limitaciones cognitivas humanas que favorecen y restringen las propias prácticas de los científicos.

² James Clerk Maxwell nació en Edimburgo –Escocia– en 1831 y falleció en Cambridge –Inglaterra– en 1879. Estudió en las Universidades de Edimburgo y Cambridge, donde se graduó en 1854. Ocupó las cátedras de Aberdeen, el King’s College de Londres y Cambridge, donde también fue el primer director del laboratorio Cavendish. Realizó importantes contribuciones a la física estadística y al electromagnetismo, produciendo una formulación que unificaba los fenómenos eléctricos, magnéticos y ópticos; también hizo notables aportaciones a la teoría de los colores y al conocimiento de la estructura de los satélites de Saturno. En 1873 publicó *A Treatise on Electricity and Magnetism*, que es uno de los textos clásicos de la ciencia.

EL RAZONAMIENTO ANALÓGICO EN LA FÍSICA DEL SIGLO XIX

Inspirado quizás por la analogía entre el calor y la electricidad, que había establecido Thomson –conocido después como Lord Kelvin–, Maxwell utilizó a lo largo de todo su trabajo sobre el electromagnetismo el *método de las analogías físicas*, exhibiendo en su manejo una extraordinaria flexibilidad de pensamiento para proponer imágenes y modelos que, si bien muchas veces parecían muy poco verosímiles, le permitiría elaborar sistemas matemáticos que podían aplicarse con provecho en la resolución de aquellos problemas por los que estaba interesado. En su primer artículo sobre el electromagnetismo *On Faraday's Lines of Force* –escrito cuando tenía 24 años– lo expresa claramente:

"Para conseguir ideas físicas sin adoptar una teoría física debemos familiarizarnos con la existencia de analogías físicas. Entiendo por analogía física esa similitud parcial entre las leyes de una ciencia y las de otra que hace que las unas iluminen a las otras."

(Tomado de Berkson, 1974, p. 179 de la traducción castellana).

Como ha hecho notar Harman (1982), el enfoque metodológico de las analogías físicas adoptado por Maxwell en sus trabajos muestra también cierta influencia de la *filosofía escocesa del sentido común*. En efecto, los filósofos escoceses de esa época, entre los que estaba Hamilton –profesor de Maxwell en la Universidad de Edimburgo–, insistían una y otra vez en un *principio abstraccionista* del conocimiento que implicaba el uso de la comparación, una idea que se repetirá a menudo en la utilización que Maxwell hacía de las analogías físicas y matemáticas. Esta manera de razonar había sido recomendada también por Faraday en su *Experimental Researches in Chemistry and Physics* (1859):

"Creo que en la práctica de la ciencia física, la imaginación debería ser ejercitada para presentar la materia investigada desde todos los puntos de vista posibles, e incluso imposibles; para buscar analogías de semejanza y, digámoslo así, de oposición, inversas o contrapuestas [...] No podríamos razonar sobre la electricidad sin concebirla como un fluido, o una vibración, o alguna otra forma o estado."

(Tomado de Berkson, 1974, p. 82 de la traducción castellana).

Los primeros trabajos de Thomson sobre la electricidad –realizados durante la década de 1840– estuvieron orientados por una analogía matemática entre los fenómenos térmicos y eléctricos³. En ese período exploró diversas analogías físicas y matemáticas entre las leyes del calor y de la electricidad (Harman, 1982). En 1842, al elaborar una teoría sobre la electrostática, empleó un formalismo matemático análogo al de la distribución del calor de la teoría analítica de Fourier para analizar la distribución de la electricidad, en la que ésta se representaba geoméricamente mediante un flujo de fuerza eléctrica de la misma forma que la primera lo era por un flujo de calor. Además, Thomson consideró que esta analogía matemática conducía a una analogía física. En efecto, el modelo físico de la propagación del calor de partícula a partícula sugería una propagación análoga de las fuerzas eléctricas por la acción de las

³ La capacidad heurística de la analogía entre el calor y la electrostática se hizo evidente en *On the elementary laws of statical electricity*, publicado en 1845. En este trabajo, Thomson logró expresar bajo la misma forma matemática las líneas de fuerza y la acción a distancia electrostática, lo que implicaba la equivalencia formal de ambos conceptos.

partículas contiguas de algún medio interpuesto, como ya había indicado Faraday en su teoría de la propagación de las fuerzas electrostáticas por las partículas contiguas del medio dieléctrico. Sin embargo, Thomson siempre tuvo cuidado en distinguir entre la expresión de una analogía y la formulación de una verdadera hipótesis física⁴.

Por último, cabe mencionar que el empleo de analogías físicas, en las que una forma matemática común permitía relacionar fenómenos físicos dispares, también contribuyó a resaltar la unificación de estos fenómenos, lo que resultó de gran importancia para el avance de la física del siglo XIX. Son bastante ilustrativas al respecto las siguientes palabras de Boltzmann (1892):

"Las mismas ecuaciones podían considerarse como solución de un problema de hidrodinámica y de la teoría potencial. La teoría de los remolinos fluidos, así como la fricción de los gases, mostró una analogía sorprendente con la del electromagnetismo."

(p. 52 de la traducción castellana, 1986).

Una vez puesto de manifiesto –por boca de algunos de sus principales protagonistas– que el razonamiento analógico resultó de gran utilidad durante el siglo XIX en el desarrollo del electromagnetismo, se mostrará con algo más de extensión su fecundo papel en los trabajos llevados a cabo en ese ámbito por Maxwell. No obstante, primero se mencionarán con brevedad algunos antecedentes, influidos por la metafísica⁵ de Descartes –la cual tuvo un papel principal en esta historia–, de lo que más tarde se conocería como física de campos.

PRIMEROS PASOS EN EL DESARROLLO DE LA FÍSICA DE CAMPOS

Durante el siglo XVIII la teoría de la gravitación de Newton sirvió como fuente de analogía para el desarrollo de la electricidad llevado a cabo por científicos como los británicos Cavendish y Priestley o el francés Coulomb, entre otros (Oliva, 2004b). De este modo, se hacía recíproco el papel que tuvo el magnetismo como análogo en la elaboración de una teoría de la gravedad en los siglos XVI y XVII, primero por Gilbert y Kepler (Oliva, 2004a) y, después, por Borelli, Hooke y el propio Newton, aunque en este caso la analogía se usaba con *status* y propósito diferentes (Oliva, 2004b). Así pues, hacia finales del siglo XVIII se disponía ya de una teoría de la electricidad construida de acuerdo con el modelo de la teoría newtoniana, que establecía la universalidad de la atracción que los cuerpos se ejercen mutuamente a través del espacio de manera instantánea, sin necesidad de ningún medio material y siguiendo una ley inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. Aunque este tipo de

⁴ A partir de su artículo *Dynamical illustrations of the magnetic and helicoidal rotatory effects of transparent bodies on polarized light*, publicado en 1856, Thomson empezó a abandonar el uso de analogías heurísticas, sustituyéndolas por otras explicativas destinadas a describir la realidad física. Este cambio coincidió con su propósito de desarrollar un programa científico basado en *teorías dinámicas* de los fenómenos físicos, entendiéndose por tales aquellas en las que las fuerzas que tienen su origen en un sistema físico se explican a partir de movimientos de los componentes internos del propio sistema. Esta decisión le llevaría a buscar modelos mecánicos cartesianos del éter durante más de tres décadas.

⁵ Aunque hay diversos significados del término metafísica, aquí se usa una acepción aristotélica del mismo; es decir, como una teoría de los constituyentes básicos del mundo. En este sentido, una creencia metafísica sería sinónima de "una imagen del mundo".

acción a distancia no satisfacía en absoluto a las mentes cartesianas, la influencia de Newton era enorme en ese tiempo.

Durante la primera mitad del XIX las teorías de la electricidad y el magnetismo continuaban formulándose, en su mayoría, siguiendo las pautas del paradigma newtoniano de la acción a distancia, que era dominante (Mason, 1986). En Francia, científicos como Ampère y Cauchy investigaron matemáticamente con éxito las fuerzas eléctricas basándose en la ley coulombiana de la inversa del cuadrado de la distancia. Ampère apoyó sin reservas la visión newtoniana del mundo que Coulomb había extendido a la electricidad e incluso criticaba a Oersted por seguir una metafísica cartesiana plena de torbellinos (Furió y Guisasola, 1997). No obstante, en Inglaterra, Faraday, Thomson y Maxwell buscaban un mecanismo de propagación para esas fuerzas y estaban interesados en estudiar los efectos del medio interpuesto (Dampier, 1948). Estos tres científicos tenían fuertes convicciones metafísicas cartesianas, que les impulsaban a aceptar que la interacción electromagnética requiere de un tiempo para propagarse.

Por aquella época había al menos dos teorías de carácter no-newtoniano capaces de proporcionar un modelo diferente en el que basarse para expresar una teoría de la propagación electromagnética a través de un medio material (Cazenobe, 1984); una era la teoría analítica del calor de Fourier y la otra la óptica ondulatoria de Fresnel, evocadas ambas por Maxwell en el encabezamiento de su *On Faraday's Lines of Force*.

A principios del XIX la teoría de Fourier permitió establecer las leyes matemáticas de la conducción del calor a partir de la hipótesis de que el flujo de calor era proporcional al grado de temperatura. En 1822, su *Théorie analytique de la chaleur* contribuyó en buena medida a crear una física unificada basada en principios matemáticos y, de esta forma, consiguió ampliar el marco conceptual de la mecánica racional. Así mismo, Fourier resaltó la importancia de un formalismo matemático independiente de las teorías de la constitución de la materia –la naturaleza física del calor en su caso–, diferenciando entre la física y su representación matemática. Poco después, esta misma teoría sirvió también a Ohm como fuente de analogías, el cual estableció comparaciones útiles entre la temperatura y el potencial eléctrico, por un lado, y el flujo de calor y la electricidad, por otro, para obtener sus leyes de la conducción eléctrica (Dampier, 1948).

Aunque fue utilizada por Thomson para establecer un formalismo matemático análogo con el fin de analizar la distribución de la electricidad, la teoría analítica del calor de Fourier sólo permitía tratar el caso de un medio lleno formado por partes contiguas, lo que suponía una gran dificultad para la analogía física, pues las fuerzas eléctricas y magnéticas se ejercían a través del vacío. Sin embargo, la teoría ondulatoria de Fresnel establecía la hipótesis de que incluso en el vacío existía un medio homogéneo capaz de entrar en un estado de vibración, transmitir las perturbaciones y actuar como soporte de las ondas luminosas. Este medio imponderable e inobservable, pero rígido y elástico, se conocía como *éter óptico o luminífero*.

La óptica de Fresnel retomaba la teoría ondulatoria clásica de la luz de Huygens, un físico holandés contemporáneo de Newton y fiel seguidor de la metafísica cartesiana. En el siglo XVII, Huygens había unido la suposición de que la luz se mueve con

velocidad finita con la idea de que es una forma de movimiento ondulatorio que se propaga longitudinalmente a través de un medio homogéneo –el éter luminífero–, un medio sutil y continuo que llenaba todo el espacio y estaba formado por partículas duras y elásticas capaces de transmitir impulsos sin desplazarse. Cada partícula del éter oscilaba en torno a una posición media y transmitía su movimiento a las vecinas, de modo que cualquier perturbación podía propagarse esféricamente a través del espacio con una velocidad finita. Para explicarlo, Huygens recurría, en su *Traité de la lumière*, a una analogía mecánica:

"Si se coge un cierto número de bolas de igual tamaño, hechas de una sustancia bastante dura, se disponen en línea recta, de tal modo que se toquen, y se golpea la primera de tales bolas con otra parecida, se observa que el movimiento pasa instantáneamente a la última, que se separa de la hilera, sin que se aprecie movimiento en ninguna otra. Para aplicar este tipo de movimiento al que produce la luz, nada impide que consideremos que las partículas de éter están hechas de una sustancia tan próxima como queramos a la dureza perfecta y a la prontitud de un resorte."

(Tomado de Mayrargue, 1990, p. 469).

La teoría de las vibraciones ondulatorias de Huygens permitió la interpretación cualitativa de fenómenos ópticos como la refracción, la reflexión y la doble refracción de la luz. No obstante, quedó eclipsada en su tiempo por la teoría corpuscular de Newton, hasta que fue retomada por algunos científicos del siglo XIX, como el inglés Young y el francés Fresnel. El primero mantuvo la hipótesis de Huygens de que las ondas de luz se propagan longitudinalmente como las ondas acústicas, esto es, en la dirección del movimiento. Por el contrario, Fresnel estableció la hipótesis de que las vibraciones del éter luminífero tienen lugar perpendicularmente al avance de las ondas luminosas, es decir, eran vibraciones transversales; una idea que también había sido expresada en el siglo XVII por el físico inglés Hooke, contemporáneo de Newton y Huygens.

Dampier (1948) ha apuntado que la teoría ondulatoria de la luz de Fresnel, con sus vibraciones transversales de un éter óptico que precisaba de propiedades elásticas más parecidas a las de un sólido que a las de un fluido, abrió el primer capítulo de lo que hoy conocemos como la física clásica de campos. En palabras de Hull (1978):

"De este modo otra concepción del siglo XVII, la teoría ondulatoria de la luz, se convirtió en un ingrediente de la ciencia moderna, una vez que adoptó la fina forma electromagnética. Ello dio lugar a la unificación de la óptica con la teoría de la electricidad."

(p. 286 de la traducción castellana).

El segundo capítulo tuvo que ver con las aportaciones de Faraday y Maxwell al electromagnetismo, a las que se dedicará atención en el siguiente apartado.

EL USO DEL RAZONAMIENTO ANALÓGICO EN LA ELABORACIÓN DE LA TEORÍA DEL CAMPO ELECTROMAGNÉTICO

En noviembre de 1831 Faraday había hecho ya un dibujo de las *curvas magnéticas* que rodean a un imán de barra (véase la figura 1), una imagen que aparecería luego

publicada en el primer volumen de su serie de memorias tituladas *Experimental Researches in Electricity* (1839-1855). Aunque no había utilizado antes estas curvas, su geometría le era bastante familiar porque otros científicos las habían usado para describir los fenómenos magnéticos, basándose en la similitud con las líneas de latitud y longitud terrestres y con las isotermas que representaban la distribución de temperatura de la Tierra (Cantor, Gooding y James, 1994).

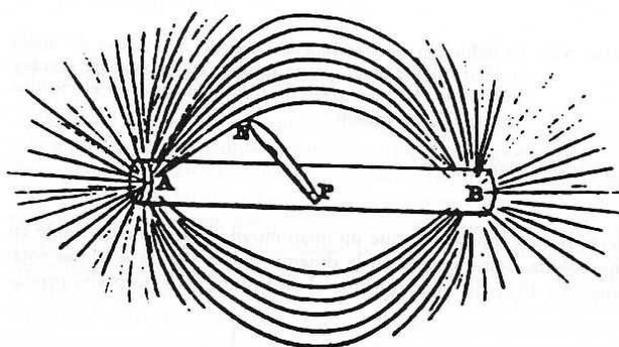


Figura 1.- Primer dibujo publicado por Faraday, en 1831, de las curvas magnéticas que rodean a un imán de barra.

En las décadas de 1830 y 1840 Faraday sostenía ya que las fuerzas eléctricas se transmitían entre las partículas de un medio y usó la noción de *líneas de fuerza* para representar geoméricamente la disposición de las fuerzas eléctricas y magnéticas en el espacio. En 1845, durante el transcurso de sus investigaciones sobre el efecto magneto-óptico, llamó por primera vez *campo*⁶ a la región del espacio que hay entre los polos magnéticos, la cual está llena de líneas de fuerza –Faraday siempre entendió el campo como un espacio lleno de líneas de fuerza eléctricas o magnéticas–. Así pues, alrededor de 1850 el concepto de campo estaba bien establecido en la física británica (Harman, 1982), pero faltaba una explicación de su constitución física.

Como más adelante señaló Maxwell en *On Faraday's Lines of Force* (1855-56)⁷, las líneas de fuerza del espacio que rodea a un imán –las curvas magnéticas de Faraday– dan cuenta de la dirección de la fuerza del campo, pero no de su intensidad en cualquier punto. Para resolver esta cuestión, Maxwell elaboró un *modelo geométrico* del campo en el que imaginaba un fluido incompresible moviéndose por tubos formados por líneas de fuerza; de otra forma, consideró que las curvas magnéticas no eran líneas simples, sino tubos muy finos de sección variable que transportaban un fluido incompresible. De este modo, la dirección y la intensidad de la fuerza quedaban respectivamente representadas en cualquier punto del campo por la dirección e intensidad del fluido imaginario (Berkson, 1974). No obstante, también subrayó que

⁶ Inicialmente Faraday dio al *campo* el significado de una distribución de fuerzas en el espacio; después utilizó este concepto para designar a las fuerzas como una propiedad mediadora del éter. Así mismo, concibió primero el éter constituido por partículas discretas que limitaban su acción a las contiguas y, más adelante, como un medio continuo o *plenum*.

⁷ Este escrito tiene dos partes, publicadas respectivamente en 1855 y 1856. En él, Maxwell siguió el método de las analogías de Thomson para interpretar las ideas de Faraday sobre los fenómenos electromagnéticos a partir de la noción del éter, lo cual le permitiría construir modelos del campo electromagnético que cumplieran con las leyes de la mecánica newtoniana.

semejante modelo geométrico no podía considerarse como una representación física verdadera del campo, puesto que el fluido incompresible ni siquiera era hipotético; tan sólo se trataba de presentar las ideas matemáticas de una forma más tangible. Aunque el concepto de flujo de fluido venía sugerido por una analogía matemática entre el flujo de calor y el flujo de fuerza eléctrica, esta representación geométrica no era propiamente una hipótesis física (Harman, 1982).

En ese mismo escrito Maxwell introdujo una analogía hidrodinámica, en la cual la carga eléctrica positiva se consideraba como una *fente* o *manantial* que vierte continuamente una cantidad de fluido que depende de su intensidad. Por contra, la carga eléctrica negativa era como un *pozo* o *sumidero*, que absorbe todo el fluido de las proximidades de manera proporcional a su intensidad; de acuerdo con lo que indicaba Faraday, como había la misma cantidad de carga positiva que de negativa, los sumideros nunca dejaban de absorber fluido (Harman, 1982). Se trataba, pues, de un fluido muy extraño, que continuamente está creándose en un lugar y destruyéndose en otro; pero, tratándose de una analogía, Maxwell estimaba que podían asignársele todas las propiedades que se quisieran. Por tanto, no llegó a plantear una teoría coherente del campo, sino tan sólo una serie de imágenes hidrodinámicas, ya que ese trabajo tenía como único propósito la presentación de una concepción más clara de las líneas de fuerza en el espacio donde se dibujan (Bauer, 1973).

Parece ser que en 1855 Maxwell no estaba todavía en condiciones de relacionar la óptica ondulatoria de Fresnel con los fenómenos electromagnéticos conocidos en esa época. Como hace notar Cazenobe (1984, p. 976):

"Debido a ello se limitó a recurrir al modelo restringido que le proporcionaban las ecuaciones de la hidrodinámica: trató de asimilar las líneas de fuerza de Faraday a corrientes originadas en el seno de un fluido incompresible. Pero es muy probable que no perdiera de vista su proyecto de relacionar la electricidad con la óptica, puesto que volvió a él en cuanto se le presentó la ocasión."

Por tal motivo, en *On Faraday's Lines of Force*, utilizó, por un lado, la analogía entre el comportamiento de las líneas eléctricas y magnéticas y, por otro, la del movimiento de un hipotético fluido sin rozamiento. Desde luego, no pretendía que las líneas de fuerza fueran los movimientos de semejante fluido, tan sólo afirmaba que se podía conseguir una comprensión más clara de éstas articulando la analogía en términos matemáticos. De esta manera, el modelo geométrico del flujo de fluido incompresible sirvió para proporcionar una materialización física de las líneas de fuerza de Faraday. Años después, Boltzmann (1892) interpretaría perfectamente la metodología seguida por el físico escocés:

"Maxwell aclara ya en el primer trabajo sobre la teoría eléctrica [On Faraday's Lines of Force] que él no se proponía dar ninguna teoría de la electricidad, es decir, que él mismo no creía en la realidad de los fluidos incompresibles, de las resistencias que él admitía allí, sino que sólo se proponía dar un ejemplo mecánico que mostrase una analogía general con los fenómenos eléctricos y que quería presentar a estos últimos de forma que se pudieran comprender de la manera más fácil posible."

(p. 52 de la traducción castellana, 1986).

El segundo escrito de Maxwell sobre el electromagnetismo, titulado *On Physical Lines of Force*⁸ (1861-1862), supuso un gran salto cualitativo. En este nuevo estudio se propuso establecer una teoría del electromagnetismo basándose en la hipótesis de un éter único como sustrato del campo electromagnético, si bien se preocupó más por esbozarla, perfilando sus principales ideas y formulando sus ecuaciones, que por desarrollar auténticas demostraciones (Cazenobe, 1984). Con tal propósito, utilizó analogías mecánicas e imágenes mecanicistas o "*representaciones alegóricas*" –como a él le gustaba decir– acerca de la constitución del éter, de acuerdo con la tradición inaugurada por Thomson en su *Mechanical Representation of Electric, Magnetic, and Galvanic Forces* (1847); un trabajo éste que, como señala Bauer (1973), ofreció a Maxwell ilustraciones concretas de las ideas de Faraday en forma de modelos de analogías físicas mecánicas.

Para ello Maxwell desarrolló un modelo mecánico analógico del éter basado en la rotación de los *vórtices o remolinos magnéticos moleculares* que Thomson había anticipado en 1856. En este modelo representaba el medio electromagnético en forma de un éter celular, que describía como si fuera el panal de una colmena en la que cada célula era un vórtice molecular rodeado por una capa de partículas esféricas a modo de bolas de cojinete o rueda de engranaje (Harman, 1982). De otra forma, Maxwell consideró que el éter podía estar formado por múltiples células o moléculas hexagonales cuya rotación engendra el magnetismo, entre las que se insertan las partículas del fluido eléctrico incompresible como si fueran bolas de cojinete (véase la figura 2). Maxwell exponía su hipótesis sobre los vórtices magnéticos de la siguiente manera:

"La única idea que me ha ayudado a concebir este tipo de movimiento es que los remolinos están separados por una capa de partículas girando cada una alrededor de su propio eje, en dirección opuesta a la de los remolinos, de forma que las superficies de contacto entre partículas y remolinos tienen el mismo sentido de movimiento.

En mecánica, cuando se quiere que dos ruedas giren en la misma dirección, se coloca entre ellas otra rueda que engrane con ambas, y que se llama "piñón loco", la hipótesis que sugiero sobre los remolinos es que entre cada dos remolinos contiguos se interpone una capa de partículas que actúa como piñón loco; de esta forma cada remolino tiende a hacer que sus vecinos se muevan en la misma dirección."

(Tomado de Berkson, 1974, p. 187 de la traducción castellana).

⁸ Esta memoria de investigación consta de varias partes publicadas entre 1861 y 1862. Maxwell intentó en ella dar una explicación mecánica de las ecuaciones del electromagnetismo que había formulado en su primer escrito. En la primera parte, publicada en marzo de 1861 y titulada *The theory of molecular vortices applied to magnetic phenomena*, representó las líneas de fuerza magnéticas como un fluido de vórtices moleculares con una velocidad angular proporcional a la intensidad del campo magnético. El modelo celular del éter aparece descrito en las dos partes que publicó en 1861 y con él obtuvo una primera versión de sus ecuaciones electromagnéticas. Las otras partes, publicadas en 1862, daban continuación a este trabajo para desarrollar una teoría más general. En las mismas, estableció formalmente la simetría entre el campo eléctrico y el campo magnético y, después, encontró que la velocidad finita de la transmisión de las ondas transversales transmitidas en este medio coincidía con la de la luz, lo que permitiría identificar al éter luminífero con el éter electromagnético, abriendo así la puerta a la unificación de los fenómenos ópticos y electromagnéticos.

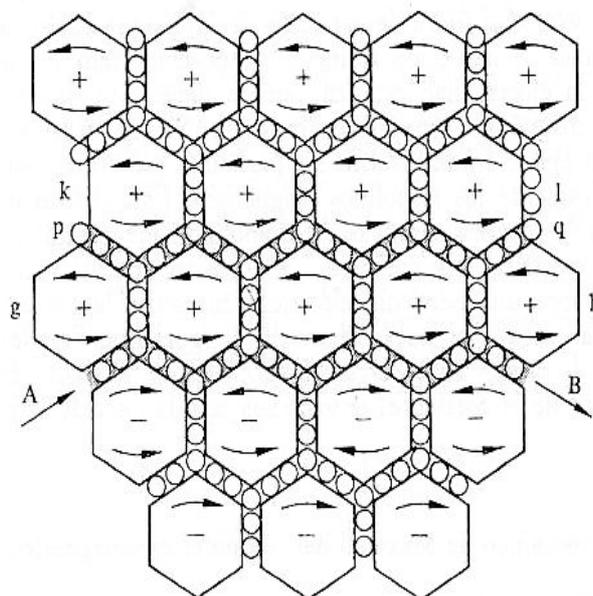


Figura 2.- Modelo del éter utilizado por Maxwell en su escrito "On Physical Lines of Force".

El modelo del éter de Maxwell supone, pues, un entramado de vórtices magnéticos inmerso en un fluido incompresible. Cada remolino está separado de sus vecinos por una capa de partículas eléctricas esféricas, que giran en direcciones opuestas a la rotación de los vórtices. La circulación de estas partículas constituiría la corriente eléctrica (Mason, 1986), cuya tensión vendría determinada por la presión que éstas se ejercen entre sí. La transmisión de la acción eléctrica puede explicarse por la comunicación de la velocidad de rotación de los vórtices de una parte del campo a otra. Actuando como bolas de engranaje, las partículas eléctricas hacen posible que los vórtices adyacentes giren en la misma dirección. Mientras la corriente esté pasando las partículas se moverán de un vórtice a otro y, al desplazarse éstas, pueden saltar y provocar una pérdida de energía como calor. Sin embargo, mientras estén girando no hay rozamiento entre las partículas y los vórtices, por lo que no se producirán pérdidas de energía y, en tal caso, sería posible mantener indefinidamente un campo magnético. Además, Maxwell también supuso que los vórtices magnéticos eran elásticos; hipótesis que le permitía dar una explicación de la electricidad estática (Berkson, 1974):

"[...] en un dieléctrico, los ejes de los remolinos magnéticos no pueden moverse. Si una causa exterior al mecanismo ejerce fuerzas sobre las partículas eléctricas, éstas deforman elásticamente los remolinos magnéticos. Esta deformación pone en juego a las fuerzas elásticas del remolino, que presiona sobre las partículas eléctricas circundantes. Se supone que la fuerza de un remolino sobre una partícula eléctrica representa la fuerza eléctrica debida a la carga. Así pues, Maxwell, al igual que Faraday, aportó una teoría de campo de la carga. La adopción de tal teoría de la carga (y por tanto de la corriente) le valió los resultados más originales de su teoría."

(p. 188 de la traducción castellana, 1981. El énfasis en el original).

Por último, Maxwell aplicó también este mismo razonamiento analógico, basado en sus imágenes mecánicas, para explicar cómo se produce la inducción electromagnética, que es quizás la parte más importante y bella de su modelo, pero que por su extensión no se reproduce aquí (véase una excelente descripción de tal explicación en Berkson, 1974, pp. 190-191 de la traducción castellana, 1981).

En su primer escrito *–On Faraday's Lines of Force–* Maxwell había desarrollado matemáticamente muchas de las ideas de Faraday. En el segundo *–On Physical Lines of Force–* expuso un modelo para el campo electromagnético y sus propiedades matemáticas, esbozando una nueva teoría del electromagnetismo, que se convirtió en el núcleo de toda su investigación posterior. Al igual que Thomson, creía que el campo electromagnético estaba constituido por un éter, que sería un medio de propagación común para la electricidad, el magnetismo y la luz. Este nuevo trabajo estaba plagado de imágenes mecánicas que, a pesar de ser abandonadas después en *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, fueron esenciales para, razonando como los geómetras, poder formular las principales ecuaciones del campo electromagnético, enunciar sucintamente su teoría electromagnética de la luz y precisar los conceptos más fundamentales (Cazenobe, 1984). El método seguido por Maxwell llamó mucho la atención de científicos como Hertz y Boltzmann, llegando este último a escribir (Boltzmann, 1892):

"En su segundo escrito [On Physical Lines of Force] va mucho más lejos y construye un mecanismo admirable a partir de remolinos hidráulicos y rodillos de fricción que se mueven dentro de paredes eléctricas, y que sirve como modelo mecánico para el electromagnetismo. Este mecanismo fue caricaturizado por los que, como Zöllner, lo tomaban como una hipótesis en el antiguo sentido de la palabra y opinaban que Maxwell les asignaba realidad.

[...] Quiero sólo añadir a las palabras de Hertz que las ecuaciones de Maxwell son mera consecuencia de sus modelos mecánicos y que su elogio entusiasta corresponde, en un primer lugar, no al análisis de Maxwell, sino a su sagacidad para descubrir analogías mecánicas.

[...] Maxwell utilizó siempre analogías mecánicas o, como él decía, ilustraciones dinámicas. Pero no las especificó con más detalle sino que buscó más bien las suposiciones mecánicas generales que eran válidas para llevar a los fenómenos análogos al electromagnetismo."

(pp. 52-53 de la traducción castellana, 1986).

Más adelante el propio Maxwell diría que sus imágenes mecánicas para representar la estructura del campo electromagnético eran más una ilustración heurística que un verdadero modelo explicativo. No obstante, oyendo hablar de cojinetes entre vórtices magnéticos elásticos, no faltaron críticos que no comprendieron en absoluto su método y se opusieron enérgicamente al mismo declarando inverosímiles y absurdas sus hipótesis. Sin embargo, es muy difícil comprender correctamente la orientación de los posteriores desarrollos de la teoría del campo electromagnético de Maxwell si no se relacionan con el soporte intuitivo que les dio origen, esto es, con sus originales analogías mecánicas. Berkson (1974) lo expresa de la siguiente manera:

"El modelo mecánico del campo electromagnético de Maxwell es uno de los más imaginativos pero menos verosímiles que nunca se hayan inventado. Es el único modelo del éter que logró unificar la electricidad estática, la electricidad corriente,

los efectos inductivos y el magnetismo, y a partir de él, Maxwell dedujo sus ecuaciones del campo electromagnético de la luz. La deducción de las ecuaciones es enrevesada y asombrosa. Continuamente atribuye al modelo propiedades descabelladas, sin que quepa en cabeza humana que haya un sistema real que posea tales propiedades. Pero Maxwell se mueve dentro de este laberinto de suposiciones con total seguridad y claridad de propósito."

(pp. 188-189 de la traducción castellana, 1981).

Pese a todo, como señala Harman (1982), Maxwell era consciente de las limitaciones de su modelo mecánico, así como de su *status* tentativo e ilustrativo. Así, en una carta dirigida, en 1867, a su amigo el también físico escocés Tait, le manifestaba que su modelo del éter había sido:

"[...] construido para mostrar que los fenómenos pueden ser explicados por medio de un mecanismo. La naturaleza del mecanismo es a la naturaleza del verdadero mecanismo lo que un planetario de ruedas y engranajes es al sistema solar."

(Tomado de Harman, 1982, p. 114 de la traducción castellana).

Aunque imaginario, la gran capacidad heurística de su modelo mecánico del éter quedó fuera de toda duda cuando, una vez establecidas las leyes dinámicas que rigen su teoría y a partir de las tensiones vibratorias introducidas en él, Maxwell pudo deducir que la propagación de las perturbaciones ondulatorias se produciría a la velocidad de la luz. De esta manera, la óptica quedaba relacionada cuantitativamente con el electromagnetismo. En palabras del propio Maxwell:

"[...] la luz consiste en ondulaciones transversales del mismo medio, lo que constituye la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos."

(Tomado de Mason, 1986, p. 123 de la traducción castellana).

A pesar de los buenos resultados obtenidos, su insatisfacción con el modelo mecánico del éter que había empleado en *On Physical Lines of Force* y su preocupación por el *status* del mismo, le obligaba a profundizar más en el mecanismo establecido hasta obtener una teoría completamente mecánica del campo electromagnético o bien a liberar la teoría y sus resultados del mecanismo usado. En *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* (1864-1865)⁹ optó por lo segundo, centrándose en las ecuaciones que había deducido en su anterior escrito para las perturbaciones ondulatorias del éter. En palabras de Berkson (1974):

"En un principio Maxwell se apoyó en la imagen "cartesiana" del mundo, donde el medio omnipresente [el éter] obedece las leyes de la mecánica de Newton. Pero, incapaz de construir una explicación mecánica viable del campo electromagnético, independizó las ecuaciones de la analogía mecánica y, a pesar de no contar con un mecanismo para el campo, trató de defender una teoría de campos. Presentó para ello [en A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field] un fuerte argumento, la

⁹ Como indica el propio título, en este trabajo Maxwell se centró en una teoría dinámica del campo electromagnético. En él siguió parcialmente el programa dinámico de Thomson, pero también la dinámica generalizada de Lagrange y Hamilton. El enfoque utilizado se basó, sobre todo, en los métodos de la dinámica analítica de Green y MacCullagh. El formalismo lagrangiano le permitió mantener su concepción mecanicista del electromagnetismo, evitando tener que especificar cualquier estructura mecánica del éter. Aunque en este artículo Maxwell continuó trabajando con otros modelos del éter, la diferencia sustancial es que ahora no tenían carácter explicativo sino heurístico e ilustrativo.

deducción de la teoría electromagnética de la luz, así como la posibilidad de contrastarla."

(p. 220 de la traducción castellana, 1981).

Puede decirse que hay un antes y un después de *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* en la historia del campo electromagnético. Cuando todavía no había aparecido este estudio, eran pocos los físicos interesados por las teorías de campos. Quienes no estaban de acuerdo con ellas podían rechazarlas –y así lo hicieron– calificándolas de puras especulaciones metafísicas. Después de la publicación de este escrito, cambió la situación y fueron muchos los que se interesaron, en un sentido u otro, por el campo electromagnético. Según Berkson (1974), el principal motivo para este cambio de actitud fue que Maxwell construyó por primera vez una teoría de campos que era contrastable frente a las teorías de las fuerzas newtonianas, modificando así la problemática de la metafísica en el siglo XIX.

En ese mismo escrito Maxwell demostró también que había un número infinito de representaciones mecánicas del campo capaces de explicar de manera consistente la interacción entre las corrientes eléctricas, lo que ratificó en su última gran obra sobre el tema, el *Treatise on Electricity and Magnetism* (1873)¹⁰. De esta manera, la teoría del campo electromagnético desarrollada resultaba independiente de cualquier hipótesis que implicara una concepción mecánica del campo. No obstante, de acuerdo con sus creencias metafísicas, la representación física del campo sí precisaba de este tipo de hipótesis. Tal y como sugería el efecto magneto-óptico, el campo debía tener una estructura material en movimiento rotatorio, aunque luego, para elaborar la teoría, pudiera ignorarse la naturaleza del mecanismo real. Quizás por ello, en sus últimos escritos de la década de 1870 –más concretamente en un extenso capítulo del *Treatise*– volvió a considerar la cuestión de la interpretación mecánica del campo electromagnético. En ese tratado intentó desarrollar la hipótesis de los vórtices de Thomson de forma diferente a como lo había hecho en su primera analogía mecánica, sugiriendo ahora que los vórtices magnéticos moleculares podían ser discontinuidades de un éter continuo que llenaba todo el espacio:

"Creo que hay buenas pruebas para creer que en el campo magnético se da cierto fenómeno de rotación, que esta rotación la ejecutan gran número de porciones muy pequeñas de materia que giran en torno a sí mismas, orientados sus ejes en la dirección de la fuerza magnética, y que las rotaciones de todos estos remolinos dependen unas de otras a través de algún tipo de mecanismo que las conecta. El intento que en aquél momento hice [en On Physical Lines of Force] para imaginar un modelo operativo de este mecanismo hay que tomarlo por lo que realmente es: una demostración de que es posible pensar en el mecanismo como algo capaz de proporcionar una conexión mecánicamente equivalente a la conexión real que existe entre las partes del campo electromagnético. El problema de determinar el mecanismo necesario para establecer una clase concreta de conexión entre los movimientos de las partes de un sistema admite siempre infinitas soluciones.

¹⁰ En este célebre tratado alcanzó su culminación el enfoque dinámico iniciado en su anterior trabajo. En vez de seguir el punto de vista de Lagrange, Maxwell adoptó una interpretación dinámica del electromagnetismo que basaba el formalismo matemático en la noción de fuerza, pues, como sostenía, nunca se debía perder de vista la intuición física. Para ello usó la formulación analítica de la dinámica que Thomson y Tait habían desarrollado en el *Treatise on natural philosophy*.

Algunas pueden ser más torpes o más complejas que otras, pero todas deben satisfacer las condiciones de un mecanismo en general."

(Tomado de Berkson, 1974, p. 222 de la traducción castellana).

SÍNTESIS HISTÓRICA

Desde Faraday en adelante las teorías de campos proporcionaron nuevas soluciones al viejo problema de cómo puede actuar un cuerpo sobre otro, cuyos antecedentes pueden rastrearse al menos desde la filosofía de la Grecia clásica. Lo que hay en común en todas ellas es que cualquier acción a distancia de un cuerpo sobre otro se hace a través de un medio como sustrato de la interacción, sea éste el éter u otro cualquiera. La teoría electromagnética de Maxwell fue el primer paso importante para socavar la visión newtoniana del mundo, esto es, la tesis de que el mundo físico puede explicarse como un sistema material regido por las leyes mecánicas de Newton; una idea ésta que, no obstante, Maxwell apoyaba con firmeza (Chalmers, 1982), aunque en apariencia parezca una paradoja. En efecto, uno de los propósitos de su programa científico era explicar las ideas de Faraday sobre los fenómenos electromagnéticos a partir de una teoría mecánica de un éter cartesiano. Sin embargo, las consecuencias de la búsqueda de esta teoría mecánica del éter fueron justamente las contrarias, porque, como pudo comprobarse durante las primeras décadas del siglo XX, la relación entre la teoría de Newton y la de Maxwell es de tal naturaleza que ésta no puede reducir a la primera ya que ambas tienen un *status* ontológico diferente (Furió y Guisasola, 1997).

Durante más de la mitad de su corta vida Maxwell se ocupó del importante problema conceptual suscitado por las ideas de Faraday: *¿qué relación hay entre el modelo de propagación de las fuerzas en el campo y la naturaleza de la sustancia material que debía constituir su estructura física?* Razonando a partir de imágenes y analogías de gran capacidad heurística y guiado en todo momento por sus creencias metafísicas cartesianas y mecanicistas, siempre creyó que la interpretación correcta de sus ecuaciones del campo electromagnético estaría subordinada a una teoría dinámica del mismo que cumpliera las leyes de Newton. Pudo llegar a demostrar que había infinitas representaciones mecánicas del campo coherentes con sus ecuaciones, pero, a pesar de su empeño, no llegó a encontrar un mecanismo que fuera satisfactorio.

El legado intelectual de Maxwell fue a la vez una poderosa y compleja teoría que, si bien estaba plagada de dificultades para su comprensión, abría prometedoras líneas de investigación. Así pues, no es de extrañar que su amigo Thomson continuara tratando de unificar los fenómenos ópticos, eléctricos y magnéticos mediante nuevos modelos del éter durante varios años más y lo mismo le sucediera a otros seguidores suyos, como Fitzgerald, Lodge y Larmor. Con el tiempo, las ecuaciones de Maxwell acabaron por incorporarse a la física como conocimientos ortodoxos; por el contrario, los modelos del éter, que tanta importancia tuvieron en su desarrollo, fueron abandonados por innecesarios cuando más adelante se demostró que la idea de la velocidad relativa de un cuerpo respecto al éter carecía de sentido.

Las ideas de Maxwell fueron difundidas por el continente europeo en parte gracias a Helmholtz, que trató de explicar las ecuaciones del campo electromagnético mediante una teoría más general que fuera fiel a la mecánica newtoniana, puesto que para este científico alemán el problema fundamental de la física de su época era encontrar una teoría newtoniana de la electricidad. Sin embargo, el camino para aceptar las ecuaciones de Maxwell fue abierto por otros científicos del continente como el holandés Lorentz y el alemán Hertz, que extendieron y aplicaron la teoría maxwelliana ignorando su modelo mecánico del éter y centrándose en las propiedades de los campos electromagnéticos mediante una interpretación operativa de sus ecuaciones.

Por un lado, los trabajos de Lorentz acabaron provocando que se abandonara la búsqueda de un mecanismo newtoniano para el éter electromagnético, pues su éter inmóvil eliminaba cualquier intento de explicación mecánica del campo (Berkson, 1974). Por otro, hasta que en 1887 Hertz hiciera la demostración experimental de la velocidad finita de propagación de las ondas electromagnéticas, lo cierto es que la teoría del campo electromagnético no había conseguido explicar nada nuevo que no lo hubiera sido ya en el marco de una teoría newtoniana de la acción a distancia; una convergencia de resultados desde dos perspectivas tan distintas –la de la acción a distancia y la del campo– que incluso confundía a muchos científicos de la época. Los resultados de los experimentos de Hertz resultaron consistentes con la teoría de Maxwell y en contradicción con las teorías de la acción a distancia como, por ejemplo, la sostenida por Weber. Con el éxito de Hertz, que de algún modo daría lugar después al nacimiento de la tecnología eléctrica y sus enormes repercusiones sociales, empezó la superación de la visión newtoniana del mundo, que durante dos siglos había sido considerada como uno de los símbolos representativos de la civilización occidental.

EPÍLOGO

A lo largo de este estudio se ha mostrado el importante papel del razonamiento analógico en la creatividad de Maxwell –plasmado en el exhaustivo uso que hizo de su original método de las analogías– y, de manera más general, el que representó en la construcción histórica de la teoría electromagnética durante el siglo XIX. La fertilidad de su manera de razonar mediante analogías, exhibida sobre todo en *On Physical Lines of Force*, fue resaltada por el propio Maxwell en sus escritos públicos y privados y en la correspondencia mantenida con científicos de su tiempo, pese a que algunos analistas de su obra hayan afirmado que se ha exagerado demasiado este asunto y no concedan a sus analogías más que un valor meramente sugestivo y casi marginal (Chalmers, 1973; citado por Nersessian, 2002).

En un artículo publicado también en este mismo número Oliva (2004b) propone una clasificación de distintos tipos de razonamientos analógicos, la cual es de gran utilidad para ordenar los numerosos ejemplos de analogías que nos muestra respecto a las construcciones históricas –hasta Newton– de los modelos del sistema solar y de la noción de fuerza gravitatoria (Oliva, 2004a,b). Sin embargo, no resulta fácil encajar en esta tipología el método de las analogías empleado por Maxwell.

Maxwell unificó la óptica con el electromagnetismo mediante sus ecuaciones, pero no pudo establecer conexiones válidas entre los fenómenos electromagnéticos y un éter cartesiano que obedeciera las leyes mecánicas de Newton, que era el núcleo de su programa científico, como se ha señalado en este estudio. Pese a haber contribuido a la física teórica con una importante síntesis unificadora, tuvo que descartar su modelo teórico del éter dinámico para interpretar los fenómenos electromagnéticos; en otras palabras, sus principales *analogías explicativas* no llegaron a culminarse en el sentido que apunta Oliva (2004b). Por ello, quizás podría pensarse que el método seguido por Maxwell se ajusta mejor a la categoría de *analogías figurativas* o incluso a la de las *analogías ilustrativas* (Oliva, 2004b). En efecto, como se ha expuesto en este trabajo, en ciertos momentos –por ejemplo, en su correspondencia privada con Tait– Maxwell reconoció las limitaciones de su modelo del éter, concediendo a su razonamiento analógico un valor más heurístico e ilustrativo que explicativo. Sin embargo, fiel a su propósito principal, el retorno a la búsqueda de un modelo mecánico explicativo en su *Treatise* –basado en el éter cartesiano–, que pudiera culminar en una teoría dinámica completa del campo electromagnético, hace bastante difícil la clasificación unívoca del razonamiento analógico de Maxwell en cualesquiera de estas categorías.

Por otra parte, de modo indirecto, en este artículo también ha quedado patente que no existe un método científico universal que pueda encorsetarse en determinadas etapas fijas y rígidas, como el que se expone en muchos libros de texto y transmiten en ocasiones los diversos medios de comunicación social. Se ha podido percibir que son muchos y variados los aspectos que inciden en la construcción de una teoría científica, tales como las creencias metafísicas, la creatividad, la originalidad y el uso diverso de representaciones geométricas y analogías, siendo en consecuencia muy frecuente la utilización de distintas metodologías. Por ejemplo, aquí se ha puesto de manifiesto cómo las creencias metafísicas de los científicos –cartesianas en este caso– están presentes en las investigaciones de Maxwell y las de otros científicos que se han citado, pudiendo llegar a ser una cuestión clave para lograr cambios conceptuales relevantes, que en ocasiones van unidos a cambios ontológicos en la visión del mundo de la comunidad científica.

Para concluir, cabe sugerir que el uso de casos como el abordado en este estudio, puede hacer de la historia de las ciencias un importante referente en la formación del profesorado de ciencias. Del mismo modo, los profesores también pueden acudir a ella como útil fuente de recursos para, una vez adaptados adecuadamente, proporcionar a sus alumnos una mejor comprensión de la naturaleza de la ciencia, el trabajo científico y los procedimientos metodológicos relacionados. De esta forma, también se estará contribuyendo a conseguir una alfabetización científica más completa y rica para todas las personas, la cual debe ser la principal finalidad de la enseñanza de las ciencias en el presente (Acevedo, Vázquez y Manassero, 2003).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVEDO, J.A. (1990). Aportaciones acerca del aprendizaje por analogía: modelos analógicos y conceptuales de la corriente eléctrica. En Grupo Investigación en la Escuela (Comp.): *Cambio educativo y desarrollo profesional* (VII Jornadas

- Investigación en la Escuela), pp. 201-208. Sevilla: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Sevilla.
- ACEVEDO, J.A., VÁZQUEZ, A. y MANASSERO, M.A. (2003). Papel de la educación CTS en una alfabetización científica y tecnológica para todas las personas. En línea en *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 2(2), artículo 1, <http://www.saum.uvigo.es/reec/>.
- BAUER, E. (1973). Electricidad y magnetismo (1790-1895). En R. Taton (Director): *Historia general de las ciencias, tomo III. La ciencia contemporánea, volumen I: el siglo XIX*, pp. 233-298. Barcelona: Destino. [Original en francés, París: PUF, 1961].
- BERKSON, W. (1974). *Fields of Force. The Development of a World View from Faraday to Einstein*. London: Routledge & Kegan Paul. Traducción de L. González Seco (1981): *Las teorías de los campos de fuerza. Desde Faraday hasta Einstein*. Madrid: Alianza.
- BOLTZMANN, L. (1986). *Escritos de mecánica y termodinámica*. Madrid: Alianza. [Traducción, introducción y notas de F.J.O. Ordóñez].
- CANTOR, G., GOODING, D. y JAMES, F.A.J.L. (1994). *Faraday*. Madrid: Alianza. [Original en inglés, 1991].
- CAZENOBÉ, J. (1984). ¿Fue Maxwell precursor de Hertz? *Mundo científico*, 4(40), 974-980.
- CHALMERS, A.F. (1973). Maxwells´Methodology and his Applications of it to Electromagnetism. *Studies in the History and Philosophy of Science*, 4(2), 107-164.
- CHALMERS, A.F. (1982, 2ª Edición). *What is this thing called science?* Open University Press, Milton Keynes. Traducción de E. Pérez Sedeño y P. López Máñez (1984): *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?* Siglo XXI, Madrid.
- DAMPIER, W.C. (1948). *A History of Science and its relation to Philosophy and Religion*. Cambridge: Cambridge University Press. Traducción de C. Sánchez Gil (1972): *Historia de la Ciencia y sus relaciones con la Filosofía y la Religión*. Madrid: Tecnos.
- DREISTADT, R. (1968). An analysis of the use of analogies and metaphors in Science *Journal of Psychology*, 68, 97-116.
- FERNÁNDEZ, I., GIL, D., CARRASCOSA, J., CACHAPUZ, A. y PRAIA, J. (2002). Visiones deformadas de la ciencia transmitidas por la enseñanza. *Enseñanza de las Ciencias*, 20(3), 477-488.
- FURIÓ, C. y GUIASOLA, J. (1997). Deficiencias epistemológicas en la enseñanza habitual de los conceptos de campo y potencial eléctrico. *Enseñanza de las ciencias*, 15(2), 259-271.
- GEE, B. (1978). Models as a pedagogical tool: can we learn from Maxwell? *Physics Education*, 13, 278-191.
- GENTNER, D., BREM, S., FERGUSON, R., WOLFF, P., LEVIDOW, B.B., MARKMAN, A.B., y FORBUS, K. (1997). Analogical reasoning and conceptual change: A case study of Johannes Kepler. *Journal of the Learning Sciences*, 6(1), 3-40.
- GENTNER, D. y GENTNER, D.R. (1983). Flowing Waters or Teeming Crowds: Mental Models of Electricity. En D. Gentner y A.L. Stevens (Eds.): *Mental Models.*, pp. 99-129. Hillsdale, NJ: Erlbaum.

- HARMAN, P.M. (1982). *Energy, Force, and Matter. The Conceptual Development of Nineteenth-Century Physics*. Cambridge: Cambridge University Press. Traducción de P. Campos Gómez (1990): *Energía, fuerza y materia. El desarrollo conceptual de la física del siglo XIX*. Madrid: Alianza.
- HULL, L.W.H. (1978). *Historia y filosofía de la ciencia*. Barcelona: Ariel. [Original en inglés, 1959].
- MASON, S.F. (1986). *Historia de las Ciencias. 4. La ciencia del siglo XIX*. Madrid: Alianza. [Traducción de C. Solís].
- MAYRARGUE, A. (1990). Fresnel y el éter óptico. *Mundo científico*, 10(101), 468-471.
- MCCOMAS, W.F. (1996). Ten Myths of Science: Reexamining what we think we know about the nature of science. *School Science and Mathematics*, 96(1), 10-16.
- MUSCARI, P.G. (1988). The metaphor in science and in the science classroom. *Science Education*, 72(4), 423-431.
- NERSESSIAN, N.J. (1992). How do scientists think? Capturing the dynamics of conceptual change in science. En R.N. Giere (Ed.): *Cognitive Models of Science, Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, 15, 3-44. Minneapolis, MN: University of Minnesota Press. En línea en <http://www.cc.gatech.edu/aimosaic/faculty/nersessian/papers/how-doscientists-think.pdf>.
- NERSESSIAN, N.J. (1995). Should Physicists Preach What They Practice? Constructive Modeling in Doing and Learning Physics. *Science & Education*, 4(3), 203-226. En línea en <http://www.cc.gatech.edu/aimosaic/faculty/nersessian/papers/should.pdf>.
- NERSESSIAN, N. J. (2002). Maxwell and "the Method of Physical Analogy": Model-based reasoning, generic abstraction, and conceptual change. En D.B. Malament (Ed.): *Essays in the History and Philosophy of Science and Mathematics*, pp. 129-166. LaSalle, IL: Open Court. En línea en <http://www.cc.gatech.edu/aimosaic/faculty/nersessian/papers/maxwell-and-the-method-of-physical-analogy.pdf>.
- OLIVA, J.M. (2004a). El papel del razonamiento analógico en la construcción histórica de la noción de fuerza gravitatoria y del modelo del sistema solar (Primera Parte). *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 1(1), 30-43. En línea en http://www.apac-eureka.org/revista/Volumen1/Numero_1_1/Vol_1_Num_1.htm.
- OLIVA, J.M. (2004b). El papel del razonamiento analógico en la construcción histórica de la noción de fuerza gravitatoria y del modelo del sistema solar (Segunda Parte). *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 1(3), 167-186. En línea en http://www.apac-eureka.org/revista/Volumen1/Numero_1_3/Vol_1_Num_3.htm.
- OLIVA, J.M. y ACEVEDO, J.A. (2004). Pensamiento analógico y movimiento de proyectiles. Perspectiva histórica e implicaciones para la enseñanza. *Revista Española de Física* (aceptado para su publicación).