

Enfoque Ontosemiótico en Didáctica de las Ciencias Experimentales¹

Ontosemiotic Approach to Science Education

Juan D. Godino

Universidad de Granada (España)

jgodino@ugr.es

Resumen

El Enfoque Ontosemiótico (EOS) ha surgido como una propuesta para desarrollar un sistema teórico modular e integrador en la didáctica de la matemática. Este enfoque aborda no solo los problemas educativos-instruccionales, sino también las cuestiones epistemológicas, ontológicas, semióticas y psicológicas implicadas. El EOS incluye, como módulos de partida, una teoría de la actividad matemática y de los objetos emergentes, así como una teoría del significado y la cognición, que pueden aplicarse al campo de la educación en ciencias experimentales. Asume postulados antropológicos y pragmatistas sobre el conocimiento matemático que son igualmente aplicables al conocimiento científico, articulando la perspectiva lógico-formal de las matemáticas con la visión empirista-fáctica vinculada a los contextos de aplicación. Los módulos ontológico y epistemológico sirven de base para desarrollar una teoría del significado en la que se articulan los enfoques semióticos realistas-referenciales con los pragmatistas. Esta teoría del significado se utiliza para desarrollar un enfoque semiótico de la cognición humana. En este trabajo, presento el EOS como un sistema teórico pertinente y útil para abordar los problemas fundacionales de la investigación educativa en el campo de las ciencias experimentales. Describo ejemplos de aplicación de algunas herramientas del EOS que han sido publicados sobre didáctica de la física y la química. Así mismo, mostraré la aplicación de las herramientas de análisis ontosemiótico al caso de la reconstrucción de los significados del concepto de carga eléctrica y de la ley de Gauss para el campo eléctrico. Este tipo de análisis evidencia la complejidad ontosemiótica de constructos fundamentales del electromagnetismo y contribuye a la comprensión de las dificultades de aprendizaje y los retos del diseño educativo.

Palabras clave

Investigación, Didáctica de las Ciencias, Marcos teóricos, Enfoque ontosemiótico

1. Introducción

La investigación en educación científica y matemática se desarrolla en un entorno epistemológicamente plural, donde la coexistencia de múltiples marcos teóricos genera tensiones persistentes en torno a la articulación de modelos instruccionales. Esta diversidad teórica, lejos de ser un obstáculo, puede ser una fuente de riqueza si se aborda desde una reflexión explícita sobre los fundamentos epistemológicos y metodológicos que sustentan cada enfoque (Bodner & Orgill, 2007; Godino & Burgos, 2020; Mnguni, 2021). Por un lado, se encuentran las posturas objetivistas, que enfatizan la transmisión de cuerpos de conocimiento codificados; por otro, los enfoques constructivistas, que priorizan la indagación y la autonomía en el proceso de aprendizaje. Para lograr una acción efectiva sobre la práctica educativa y optimizar los procesos educativos, se requiere la elaboración de teorías instruccionales específicas que sirvan de fundamento para las decisiones en las fases de diseño, implementación y evaluación de los procesos de enseñanza (Godino & Burgos, 2020). Estas teorías instruccionales deben estar

¹ Ponencia invitada en *Congreso Internacional Sobre Educación y Tecnología en Ciencias. CISETC 2025*.

fundamentadas en modelos epistemológicos, ontológicos y semióticos explícitos que contemplen la imbricación entre los conocimientos matemáticos y científicos.

En este contexto, el Enfoque Ontosemiótico (EOS) (Godino, 2024; Godino et al., 2007) se presenta como un sistema teórico pertinente y útil para abordar los problemas fundacionales de la investigación educativa en los ámbitos de las matemáticas y las ciencias experimentales. Su relevancia se sustenta en la necesidad de modelizar y comprender la complejidad inherente de la actividad científica, en la cual el componente matemático es esencial e indisociable para la apropiación de los contenidos científicos. En este trabajo abordamos la problemática de aplicación de los supuestos y herramientas del EOS, marco teórico emergente en educación matemática, al campo de la didáctica de las ciencias experimentales.

Este artículo se articula en las siguientes secciones. En primer lugar, se presentarán los supuestos y herramientas del EOS, indicando su adecuación para abordar el análisis de la actividad científica, las prácticas operativas y discursivas que se implementan para resolver los problemas, y los objetos y procesos de representación y generalización que intervienen en los procesos resolutivos. A continuación, se incluirá una revisión de los trabajos que han aplicado este marco al campo de la didáctica de la Física y la Química, demostrando su utilidad para la caracterización de la complejidad de la actividad (Moreno, Font & Ramírez, 2016), la detección de conflictos semióticos relacionados con la notación (Badillo, Font & Azcárate, 2005) y el análisis de la idoneidad didáctica (Parra & Ávila, 2015).

Posteriormente, se describen con mayor detalle dos trabajos recientes en el campo del electromagnetismo que extienden el alcance del EOS. El primero aborda el estudio de los significados del concepto de carga eléctrica desde una perspectiva filogenética, caracterizando las diversas conceptualizaciones y las prácticas operativas y discursivas puestas en juego para su estudio (Godino, 2025a). El segundo se centra en el análisis de la complejidad ontosemiótica de la ley de Gauss del campo eléctrico (Godino, 2025b). La aplicación de esta metodología de análisis sistemático evidencia la extraordinaria complejidad de constructos fundamentales del electromagnetismo que a menudo implican una "compresión o densidad semiótica", y contribuye significativamente a la comprensión de las dificultades de aprendizaje de los estudiantes. En última instancia, el EOS proporciona un enfoque innovador para problematizar la naturaleza del conocimiento científico especializado para la enseñanza y fundamentar los desafíos del diseño educativo (Godino, 2024).

2. Supuestos y herramientas del Enfoque Ontosemiótico

El Enfoque Ontosemiótico (EOS) es un sistema teórico inicialmente elaborado para fundamentar la investigación en educación matemática pero que, en este trabajo, mostramos que también puede servir para fundamentar la investigación en didáctica de las ciencias experimentales. El EOS aporta un sistema de nociones, principios y herramientas metodológicas para estudiar y comprender la naturaleza de la actividad matemática y científica (Godino, 2023), el conocimiento científico y los procesos de enseñanza y aprendizaje de las matemáticas y de las ciencias experimentales. Está compuesto por cinco teorías articuladas (Figura 1) (Godino, 2024).

1) Teoría ontosemiótica de la actividad matemática. Desarrolla una visión antropológica y pragmatista de las matemáticas, esto es, como actividad humana centrada en la resolución de problemas. Esta visión antropológica de la matemática se complementa y articula con otras dos concepciones: la matemática como sistema de objetos y procesos y la matemática como sistema de signos.

2) Teoría ontosemiótica del significado y la cognición matemática. Desarrolla una visión global del significado de los objetos matemáticos, articulando supuestos realistas y pragmáticos, como base de la cognición matemática, tanto desde el punto de vista individual (personal) como social (institucional).

3) Teoría del diseño educativo en matemáticas. Desarrolla supuestos y herramientas teóricas para la descripción y diseño de procesos de enseñanza y aprendizaje de las matemáticas basados en la teoría específica sobre la actividad matemática y el significado de los objetos que propone el EOS.

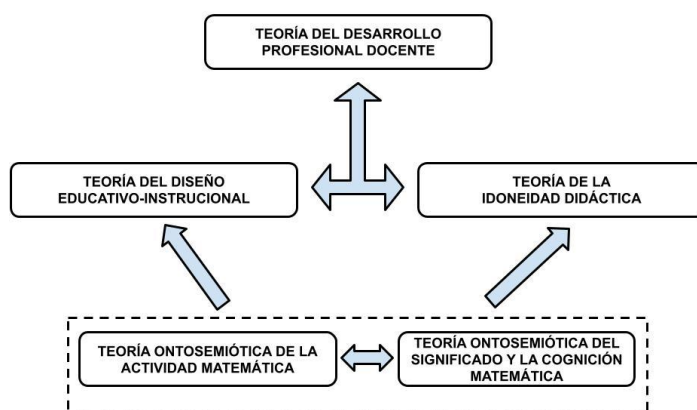


Figura 1: Sistema teórico EOS

4) Teoría de la idoneidad didáctica. Desarrolla un sistema de criterios para la optimización local del diseño, implementación y evaluación de los procesos educativos-instruccionales en matemáticas, basados en los supuestos y constructos del EOS. Se formulan criterios para las facetas epistémica, ecológica, mediacional, interaccional, cognitiva y afectiva que estructuran los procesos de enseñanza y aprendizaje.

5) Teoría del desarrollo profesional docente. Desarrolla un modelo de conocimientos y competencias del profesorado que tiene en cuenta las facetas, componentes y subcomponentes de los procesos educativos implicados en las actividades de fundamentación, diseño, planificación y evaluación de dichos procesos. Incluye también un sistema de principios o criterios de eficiencia de los programas formativos de profesores.

Diversos autores defienden el uso de múltiples marcos teóricos para abordar la investigación educativa en ciencias y matemáticas, al considerar que ningún enfoque único puede captar la complejidad del aprendizaje científico (Bodner & Orgill, 2007; Spangler & Williams, 2019; Stoilescu, 2021). En el EOS compartimos parcialmente esta postura; por ello, proponemos cinco teorías articuladas que permiten abordar de manera integrada las dimensiones epistemológicas, ontológicas, semióticas y cognitivas, como base para el desarrollo de teorías específicamente educativas. A través de estudios orientados a la clarificación y articulación teórica, y mediante una actitud abierta a la hibridación con otros enfoques, el EOS aspira a consolidarse como un sistema teórico integrador capaz de afrontar la complejidad inherente a la investigación educativa en ciencias y matemáticas (Godino, 2025).

Las teorías de la actividad matemática y del significado (Figura 1) aportan los supuestos ontológicos, semióticos y epistemológicos básicos que sirven de soporte de las teorías didácticas (diseño educativo, idoneidad didáctica y desarrollo profesional docente). Las dos primeras teorías son, por tanto, el núcleo central del EOS. En el siguiente apartado incluimos una síntesis de estas teorías justificando posteriormente su extensión al conocimiento científico. En Godino (2024) se explican con detalle las otras tres teorías que componen el sistema teórico EOS.

3.1. Principios centrales de las teorías de la actividad, objetos emergentes y del significado

El EOS se basa en la tesis de que los objetos científicos y matemáticos emergen de prácticas humanas situadas en contextos históricos y sociales. Estas prácticas dan lugar a configuraciones

ontosemióticas (Figura 2), entendidas como sistemas que integran prácticas, objetos y procesos. En el núcleo de cada configuración residen los problemas y las prácticas operativas y discursivas movilizadas para abordarlos, adoptando así una visión antropológica (Wittgenstein, 1953), pragmatista (Peirce, 1931–58) y sociocultural (Vygotsky, 1978) del conocimiento científico.

Desde esta perspectiva, el significado de un concepto se concretiza en los sistemas de prácticas operativas y discursivas activadas para resolver problemas. Estos sistemas varían según los contextos ecológicos en los que se desarrollan, lo que hace necesario reconocer la existencia de múltiples significados para cualquier constructo matemático o científico.

Además, las prácticas involucran una red de objetos con roles específicos en los procesos de resolución de problemas. Por ejemplo, el concepto de energía cinética abarca magnitudes como masa y velocidad, expresiones algebraicas como $\frac{1}{2}mv^2$, propiedades como la conservación, procedimientos de cálculo y medición, así como argumentos que justifican estas propiedades y procedimientos. Analizar el significado de un constructo requiere, por lo tanto, considerar no solo los problemas y contextos en los que aparece, sino también la red de objetos y relaciones involucradas en las prácticas. De esta manera, el EOS expande la visión pragmatista del significado —como un sistema de prácticas— al incorporar una dimensión referencial, en la que el significado se asocia con el contenido al que se refiere una expresión (función semiótica).



Figura 2: Configuración Ontosemiótica

Todo objeto teórico requiere representaciones que median su uso y comunicación: símbolos, ecuaciones y diagramas. El EOS enfatiza la importancia de las funciones semióticas, que son las relaciones entre expresión y contenido. Por ejemplo, en física, la energía se representa mediante ecuaciones como $E = \frac{1}{2}mv^2$, $Q = mc\Delta T$, or $E = mc^2$. Estas no son meras notaciones, sino mediaciones que configuran los significados atribuidos al concepto. Como señala Sfard (2008), "los símbolos y los objetos matemáticos se constituyen mutuamente", una noción que puede extenderse al discurso científico.

La resolución de problemas se concibe como un macroproceso que se desarrolla a través de secuencias de prácticas a lo largo del tiempo. Este proceso incluye operaciones elementales como definir, formular, algoritmizar y argumentar. El EOS también identifica procesos duales y dialécticos —generalización/ particularización, materialización/ idealización, descomposición/

unitarización, representación/ significación, personalización/ institucionalización— que enriquecen el análisis ontosemiótico.

3.2. De las matemáticas a la ciencia experimental: justificación filosófica para extender el EOS

Habiendo esbozado los principios centrales del EOS, pasamos ahora a la justificación filosófica para su extensión de las matemáticas a las ciencias experimentales. Esta expansión se basa en tres fundamentos filosóficos esenciales:

Naturalismo y Emergentismo. El EOS rechaza el Platonismo y postula que los objetos científicos son emergentes: surgen de las prácticas humanas y no existen independientemente de ellas (Font et al., 2013). En consecuencia, los constructos científicos, como la energía, no se concibe como una entidad metafísica preexistente, sino como un constructo cristalizado dentro de contextos de investigación específicos, como la termodinámica, la relatividad o la mecánica cuántica.

Transdisciplinariedad. Godino (2023) enfatiza que el EOS adopta un enfoque transdisciplinario, integrando la epistemología, la ontología, la semiótica y la sociología. Esta perspectiva se alinea con la naturaleza de la física, por ejemplo, donde el desarrollo de un concepto depende tanto de la experimentación empírica como de la modelización matemática y el consenso comunitario.

Ecología de significados. El EOS emplea la metáfora de una ecología de significados para describir cómo los diferentes usos de un mismo concepto coexisten, evolucionan y compiten (Godino, 1994; Godino y Batanero, 1998). Aplicado a la energía, este marco nos permite comprender que sus diversas interpretaciones —mecánica, térmica, relativista, cuántica, cosmológica— no se reducen entre sí, sino que constituyen un ecosistema de significados interrelacionados. Por lo tanto, la energía no se presenta como un concepto singular y estable, sino como un sistema dinámico de significados en continua evolución.

3. Aplicaciones del EOS en la investigación didáctica en Ciencias Experimentales

El EOS ha demostrado su pertinencia y potencialidad al extender sus supuestos y herramientas al estudio de la enseñanza y el aprendizaje en las ciencias experimentales, específicamente en Física y Química. Esta extensión se justifica en el reconocimiento de la complejidad inherente de la actividad científica, donde el componente matemático resulta indisociable para la comprensión de los contenidos científicos. La aplicación del EOS en este dominio busca describir la naturaleza del conocimiento científico y los fenómenos didácticos asociados, ofreciendo una vía para abordar el dilema constante entre los modelos de enseñanza centrados en la indagación (constructivismo) y aquellos basados en la transmisión (objetivismo) (Godino & Burgos, 2020).

3.1. Cuestiones abordadas y herramientas teóricas empleadas

Una línea principal de investigación ha estado dirigida a identificar y analizar los conflictos conceptuales y semióticos que emergen en la interacción entre la Física, la Química y sus herramientas matemáticas. Se ha documentado la confusión que experimentan los estudiantes (y en ocasiones los docentes) en conceptos cruciales del cálculo, como la distinción entre la derivada en un punto y la función derivada, un fenómeno atribuido a su significativa complejidad semiótica (Badillo, Font & Azcárate, 2005). De manera similar, se ha analizado cómo el uso de la notación incremental y diferencial en libros de texto, tanto de física como de matemáticas, sienta las bases para un conflicto semiótico potencial que se convierte en un obstáculo cognitivo relevante, especialmente en la formación interdisciplinar de profesores (Badillo, Font & Azcárate, 2005).

Para abordar esta problemática, el EOS ofrece la herramienta de la *configuración ontosemiótica*, que modela la actividad científica en términos de prácticas, objetos primarios y procesos activados (Moreno, Font & Ramírez, 2016). La aplicación de la dualidad personal-institucional permite diferenciar la configuración epistémica (el significado institucional y la solución experta) de la configuración cognitiva (el significado personal del estudiante).

La caracterización de la actividad físico-matemática se ha enfocado en el papel de las representaciones ostensivas, como los diagramas, en la resolución de problemas (Moreno, Font & Ramírez, 2016). En este contexto, el EOS emplea sus dualidades conceptuales, como la oposición ostensiva/no-ostensiva y cognitiva/epistémica, para interpretar las producciones observables de los alumnos (diagramas de cuerpo libre) como materializaciones de objetos no ostensivos (mentales) (Moreno, Hernández & Briceño, 2021). Esto ha permitido analizar la complejidad inherente a la resolución de problemas de mecánica, por ejemplo, los que involucran la fuerza de fricción (Moreno, Font & Ramírez, 2016).

En paralelo, se ha propuesto la extensión ontosemiótica del *mapa conceptual híbrido* como una técnica para analizar gráficamente la organización y conexión de objetos fisicomatemáticos, superando la ambigüedad conceptual que presenta el tándem de representación interna/externa en el análisis de la actividad didáctica (Moreno, Hernández & Briceño, 2021; Font, Godino & D'Amore, 2007). Esta herramienta se ha aplicado tanto en física (movimiento parabólico) como en química (problemas de estequiometría), permitiendo el estudio de los procesos cognitivos clave como la idealización, la materialización, la significación y la argumentación (Moreno, Hernández & Briceño, 2021; Moreno, Ramírez & Torres, 2021; Moreno, Font & Ramírez, 2016).

Finalmente, la *idoneidad didáctica*, definida como el grado de adecuación de un proceso de instrucción para lograr la adaptación entre los significados personales e institucionales (Godino, Batanero & Font, 2007; Godino, Batanero & Burgos, 2023), ha sido utilizada como metodología para valorar procesos de enseñanza específicos en física, destacando la necesidad de evaluar las facetas epistémica y cognitiva del proceso instruccional (Parra & Ávila, 2015).

3.2. Conclusiones derivadas de la aplicación del EOS

Los hallazgos de estas investigaciones proporcionan una base sólida para explicar las dificultades de aprendizaje y para fundamentar propuestas de mejora instruccional. En primer lugar, se constata que la formación de conceptos en física a menudo se reduce a la manipulación de reglas, fórmulas y técnicas de la matemática, lo cual desvincula la enseñanza del tratamiento conceptual propio de la disciplina. La causa de los conflictos semióticos en cálculo, como la confusión en el uso de la notación incremental y diferencial, se vincula directamente a la pobreza de técnicas presentadas en los manuales de texto (Badillo, Font & Azcárate, 2005).

En el contexto de la mecánica, la caracterización exhaustiva de la actividad de los estudiantes mediante las configuraciones ontosemióticas ha permitido explicar las causas de los errores al abordar la fuerza de fricción (Moreno, Font & Ramírez, 2016). Específicamente, se ha concluido que el proceso de idealización (por ejemplo, modelar un corredor como un punto) es una condición necesaria, aunque no suficiente, para la solución correcta de problemas complejos, y que el uso de representaciones prototípicas inadecuadas (como la representación de bloques) fomenta conjeturas erróneas sobre el sentido de la fuerza de fricción (Moreno, Font & Ramírez, 2016).

La interpretación del mapa conceptual híbrido desde las dualidades del EOS también ha sido crucial para describir con mayor precisión el operativismo ciego—una práctica procedimental que prescinde de la interacción conceptual y procedimental—, observando que este se relaciona con la realización inadecuada o la ausencia de procesos cognitivos esenciales, como la visualización y el empleo de criterios de argumentación apropiados (Moreno, Hernández & Briceño, 2021).

Finalmente, a nivel de diseño instruccional, el EOS resuelve el dilema entre indagación y transmisión proponiendo un modelo instruccional mixto (Godino & Burgos, 2020). Este modelo aboga por articular la transmisión de reglas epistémicas y culturales esenciales (que son normativas y han emergido de un largo proceso histórico) con momentos de indagación y resolución de problemas. Los análisis de la idoneidad didáctica confirman que para mejorar la enseñanza es imperativo romper con el enfoque cultural que reduce la física a fórmulas, y se requiere que los estudiantes examinen y empleen consistentemente múltiples representaciones (gráfica, numérica, analítica y verbal) del conocimiento (Parra & Ávila, 2015)

4. Análisis ontosemiótico de la emergencia y evolución del concepto de carga eléctrica

El concepto de carga eléctrica constituye uno de los pilares fundamentales de la física moderna, en tanto explica una amplia gama de fenómenos que abarcan desde las interacciones microscópicas entre partículas elementales hasta las manifestaciones macroscópicas de las corrientes y campos electromagnéticos. Su carácter transversal y su poder unificador lo convierten en un objeto epistemológico de especial interés para la educación científica. En Godino (2025a) se elabora una reconstrucción histórico-epistemológica de los distintos significados atribuidos al concepto de carga eléctrica, analizando su emergencia, evolución y articulación mediante las herramientas teóricas del EOS. Este marco permite comprender cómo los significados parciales del concepto se constituyen a través de prácticas operativas, discursivas, simbólicas y experimentales desarrolladas históricamente, hasta conformar un holosignificado o significado global que integra las diversas concepciones del fenómeno.

Este trabajo se inscribe en una línea de investigación que busca ampliar la comprensión del conocimiento científico y didáctico más allá de las descripciones puramente conceptuales, incorporando la dimensión pragmática, cultural y ecológica del saber (Godino, 2024; Godino, Batanero y Font, 2007). Desde esta perspectiva, los conceptos científicos no son entidades estáticas ni definiciones cerradas, sino sistemas de prácticas y relaciones entre objetos que emergen históricamente en respuesta a determinados tipos de problemas. En este sentido, el análisis de la carga eléctrica permite no solo rastrear la evolución del pensamiento físico, sino también comprender los obstáculos epistemológicos y las dificultades de aprendizaje asociadas a su enseñanza (Guisasola, Zubimendi, Almudí y Ceberio, 2008).

El artículo se estructura siguiendo una secuencia que parte de la identificación del problema y el marco teórico, para luego desarrollar cinco grandes etapas históricas —el significado cualitativo-fenomenológico, el cuantitativo macroscópico, el significado ligado al campo eléctrico, el significado atomista-corpuscular y el significado en la teoría cuántica de campos—. Cada una de estas etapas se analiza mediante las categorías del EOS, atendiendo a los fenómenos, las conceptualizaciones teóricas, las herramientas simbólicas y experimentales implicadas, y las prácticas discursivas y operativas que las caracterizan. Finalmente, estos significados parciales se integran en un modelo holístico del concepto de carga eléctrica y se reflexiona sobre sus implicaciones para el diseño de los procesos de enseñanza y aprendizaje de los fenómenos eléctricos.

El método adoptado por Godino (2025a) es un estudio documental de carácter histórico-epistemológico guiado por las herramientas del EOS. Se apoya en fuentes históricas primarias y secundarias (Heilbron, 1979; Buchwald, 2013a, 2013b; Whittaker, 1951; 1953) y en estudios epistemológicos contemporáneos que abordan el desarrollo de la electrodinámica desde una mirada ecológica y práctica (Rheinberger, 2010). A partir de este corpus, se identifican cinco grandes configuraciones de significado que expresan la trayectoria evolutiva del concepto de carga eléctrica.

4.1. Del efecto ámbar al campo: una genealogía de los significados de la carga

El primer significado identificado es el *cualitativo-fenomenológico*, que abarca desde la Antigüedad hasta el siglo XVII. En este periodo, el estudio de la electricidad se centró en la observación descriptiva de los fenómenos, particularmente el “efecto ámbar”, es decir, la atracción de objetos ligeros por el ámbar frotado. Autores como Tales de Mileto, Gilbert y Guericke observaron y clasificaron estos efectos sin llegar a formular una teoría cuantitativa o un modelo causal satisfactorio. Las explicaciones predominantes recurrían a nociones aristotélicas de “cualidades ocultas” o a teorías de efluvios, donde la electricidad se entendía como una “virtud” o emanación material (Heilbron, 1979). Los dispositivos experimentales —como el globo de azufre de Guericke— representaban el primer intento de reproducir sistemáticamente los fenómenos eléctricos, aunque el pensamiento seguía dominado por la filosofía natural precientífica.

El segundo significado, correspondiente al siglo XVIII, se define como *cuantitativo macroscópico*. En esta etapa, la electricidad deja de ser un fenómeno curioso para convertirse en objeto de experimentación sistemática y matematización. Franklin introdujo la teoría del fluido único, distinguiendo entre cargas positivas y negativas; Du Fay propuso la teoría de los dos fluidos, mientras que Coulomb formuló la ley cuantitativa de las fuerzas eléctricas inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia ($F = k \cdot q_1 q_2 / r^2$). Este tránsito hacia la cuantificación supuso un cambio epistemológico radical: la electricidad pasó a entenderse como magnitud medible y conservada. Además, la invención de la botella de Leyden, la pila voltaica y la balanza de torsión posibilitó el desarrollo de prácticas experimentales de alta precisión. Esta etapa marca la consolidación de la carga como entidad mensurable y como elemento estructural de las leyes de la física, iniciando su matematización y abstracción.

El tercer significado está ligado al *concepto de campo eléctrico*, desarrollado durante el siglo XIX. Este momento representa una verdadera revolución conceptual, al sustituir la idea de acción instantánea a distancia por la de acción mediada por un campo físico continuo. Faraday (1852) introdujo la noción de líneas de fuerza, mientras que Maxwell formalizó matemáticamente las ecuaciones que unificaron electricidad y magnetismo. El campo eléctrico y magnético dejaron de ser meras construcciones auxiliares para convertirse en entidades físicas reales con energía y momento propios. De este modo, la carga eléctrica pasó a definirse relacionamente, como la fuente o el origen del campo, y no como sustancia autónoma. Este cambio paradigmático transformó el estatuto ontológico de la carga, integrándola en una estructura matemática coherente que explicaba fenómenos como la inducción, la radiación y la propagación de ondas electromagnéticas (Furió y Guisasola, 1998). La teoría de Maxwell constituyó así el primer modelo holístico dentro de la física clásica.

El cuarto significado, de carácter *atomista-corpúscular*, emergió a finales del siglo XIX y principios del XX con el descubrimiento del electrón y la teoría electrónica de la materia. Thomson, Millikan y Lorentz demostraron que la carga eléctrica era una propiedad cuantizada, inherente a partículas elementales. La electricidad dejó de concebirse como fluido continuo para entenderse como atributo discreto asociado a unidades mínimas —los electrones y protones—. Este avance consolidó la relación entre física, química y óptica, mostrando que los fenómenos eléctricos, térmicos y lumínicos podían explicarse a partir del comportamiento de partículas cargadas (Darrigol, 2000; Kragh, 2001). La cuantización de la carga proporcionó la clave para comprender las leyes de Faraday de la electrólisis y sentó las bases de la física moderna. Desde la perspectiva ontosemiótica, esta etapa representa una reconfiguración semiótica profunda: el significado de la carga se desplaza desde lo continuo y macroscópico hacia lo discreto y estructural, acompañado por un nuevo conjunto de herramientas simbólicas (como la constante elemental $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C) y dispositivos experimentales —tubos de rayos catódicos, osciladores de Hertz, trampas de Penning— que redefinieron las prácticas científicas.

Finalmente, el quinto significado corresponde a la *teoría cuántica de campos* (TCC), que unifica la mecánica cuántica y la relatividad especial. En este marco, la carga eléctrica se interpreta como el generador de simetría gauge $U(1)$, y su conservación deriva del teorema de Noether. La TCC reconceptualiza la carga como cantidad dinámica que depende de la escala de energía, mediante los procesos de renormalización y polarización del vacío (Nair, 2005; Zee, 2003). El concepto deja de referirse exclusivamente a partículas individuales para convertirse en una propiedad emergente del estado del campo. Esta concepción culmina el proceso de abstracción iniciado en el siglo XVIII, integrando la carga en la estructura algebraica de las interacciones fundamentales.

4.2. El holosignificado de la carga eléctrica

El recorrido histórico-epistemológico descrito permite elaborar un modelo integrador del concepto, denominado *holosignificado* de la carga eléctrica, representado esquemáticamente en la Figura 3. Este holosignificado no constituye una simple síntesis de los significados anteriores, sino una red de articulaciones que expresa las conexiones, generalizaciones y transformaciones entre los distintos contextos históricos. Desde la perspectiva ecológica del conocimiento (Godino, 1994), cada significado parcial corresponde a un nicho específico de prácticas, instrumentos y discursos, y su integración en un significado global requiere reconocer las relaciones de dependencia, inclusión y generalización entre ellos.

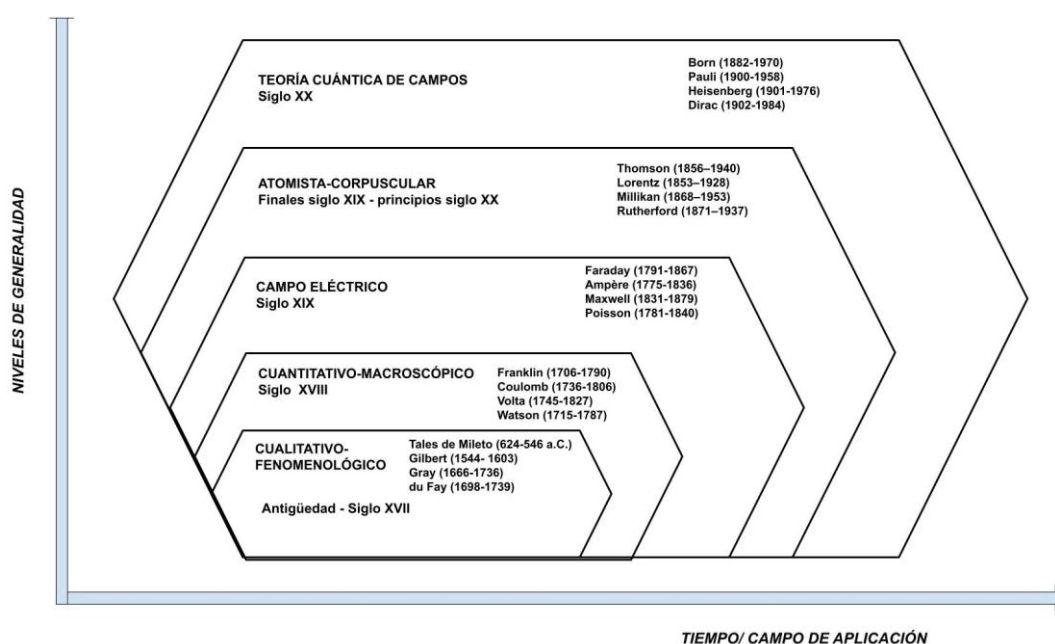


Figura 3: Holosignificado del concepto de carga eléctrica

El holosignificado describe, por tanto, la evolución del concepto de carga eléctrica como una trama de prácticas y representaciones que se amplían progresivamente desde lo fenomenológico a lo teórico. En la etapa cualitativa, la carga se asocia a una propiedad observable; en la cuantitativa, a una magnitud medible; en el nivel del campo, a una fuente de interacción; en el nivel corpuscular, a una propiedad discreta de partículas; y en la TCC, a una manifestación de simetrías matemáticas. Esta trayectoria evidencia una progresiva desmaterialización del concepto, paralela a una creciente matematización y abstracción, pero también a una mayor coherencia teórica. Como afirma Feynman (2005), la comprensión de los conceptos físicos requiere mantener el vínculo entre las formulaciones matemáticas y la realidad experimental: “La física no es matemáticas, y las matemáticas no son física; se ayudan mutuamente, pero en física hay que conocer la conexión

de las palabras con el mundo real” (p. 61). En este sentido, el holosignificado integra los aspectos ontológicos, epistemológicos y pragmáticos del concepto, reconociendo que la carga eléctrica es, simultáneamente, una propiedad empírica, un invariante matemático y una categoría teórica fundamental.

Godino (2025a) subraya, además, que el holosignificado no pretende ofrecer una definición definitiva de la carga, sino un modelo dinámico de su construcción semiótica e histórica. Siguiendo a Doménech et al. (2003), la comprensión científica debe concebirse como un proceso de aproximaciones sucesivas, donde cada estadio histórico representa una versión más amplia y coherente del significado, sin invalidar completamente las anteriores. Así, el modelo holístico propone una ecología de significados en la que coexisten diferentes niveles de generalización que pueden ser movilizados pedagógicamente según los contextos educativos y las capacidades cognitivas del alumnado.

4.3. Implicaciones educativas del enfoque holístico de carga eléctrica

La reconstrucción del holosignificado de la carga eléctrica tiene importantes implicaciones para la enseñanza y el aprendizaje de la física. En primer lugar, permite superar las visiones reduccionistas que fragmentan el conocimiento científico en compartimentos conceptuales desconectados. El EOS plantea que los significados no se limitan a definiciones verbales o fórmulas, sino que incluyen los sistemas de prácticas, herramientas y representaciones que los sustentan. Por tanto, la enseñanza de la carga eléctrica debería contemplar no solo su dimensión conceptual y procedimental, sino también su dimensión fenomenológica y epistemológica.

En segundo lugar, el enfoque ontosemiótico ofrece criterios para el diseño de secuencias didácticas que reproduzcan, en clave adaptada, la evolución histórica del concepto. Comprender cómo la humanidad pasó del “efecto ámbar” a la teoría cuántica de campos puede ayudar a los estudiantes a reconstruir de forma significativa los distintos niveles de abstracción. Este enfoque filogenético y ecológico contribuye a identificar los obstáculos epistemológicos típicos —como la concepción de la electricidad como fluido o la confusión entre carga y corriente— y a diseñar estrategias que los aborden explícitamente (Guisasola et al., 2008; Furió y Guisasola, 1998).

En tercer lugar, el modelo del holosignificado permite analizar los conflictos semióticos que surgen en los procesos de enseñanza. Estos conflictos se manifiestan cuando el significado atribuido por los estudiantes a un término difiere del significado institucional o científico. Así, los modelos simplificados de los libros de texto —que describen la corriente como flujo de electrones o el campo como conjunto de líneas visibles—, si bien útiles en etapas iniciales, deben ser problematizados y recontextualizados para evitar la fijación de concepciones erróneas (Stocklmayer y Treagust, 1994). La enseñanza basada en el EOS busca precisamente gestionar estos conflictos mediante la explicitación y reconstrucción progresiva de los significados parciales.

En el plano formativo del profesorado, el análisis ontosemiótico amplía la noción de conocimiento pedagógico del contenido (Deng, 2018; Gess-Newsome et al., 2017), al incluir la comprensión epistemológica y cultural del conocimiento científico que se enseña. Para diseñar situaciones didácticas idóneas, el docente debe dominar no solo las leyes y fórmulas, sino también los procesos históricos, las prácticas experimentales y los marcos teóricos que les dieron origen. Este tipo de conocimiento, que en el marco del EOS se denomina “conocimiento especializado para la enseñanza”, es esencial para articular el saber científico con el saber escolar, adaptándolo ecológicamente a los distintos niveles educativos.

Por último, desde una perspectiva más amplia, el holosignificado de la carga eléctrica ejemplifica la potencia del EOS para integrar historia, epistemología y didáctica. La comprensión de la ciencia como proceso de construcción semiótica y social permite replantear el currículo de física desde una lógica de progresividad conceptual, donde cada nivel educativo introduzca significados

parciales coherentes con el global. Así, el estudio inicial de los fenómenos electrostáticos puede vincularse con la idea de campo, la cuantización y la simetría, de modo que los estudiantes perciban la unidad subyacente de la física más allá de las fórmulas. Este enfoque formativo promueve una alfabetización científica más profunda, basada en la comprensión de cómo los conceptos se construyen, se transforman y se aplican en contextos humanos y tecnológicos.

5. Complejidad ontosemiótica de la ley de Gauss del campo eléctrico

La ley de Gauss constituye uno de los pilares conceptuales de la descripción fenomenológica de los campos eléctricos y la formulación matemática del electromagnetismo. Su poder explicativo y su economía formal la convierten en una herramienta fundamental tanto en la física teórica como en la enseñanza de los fenómenos eléctricos. Sin embargo, la aparente sencillez de su expresión matemática contrasta con la profunda complejidad conceptual que encierra. Comprender la ley de Gauss exige integrar nociones como campo, flujo, simetría y carga, y coordinar distintos registros semióticos —geométricos, algebraicos y verbales— que interactúan de manera no trivial. En Godino (2025b) se aplica el EOS para analizar la complejidad epistemológica y cognitiva de este constructo relacional, con el propósito de ofrecer una base teórica para mejorar su enseñanza y aprendizaje. A partir de un estudio documental de naturaleza epistemológica y didáctica, se identifican los diversos significados parciales asociados a la ley de Gauss y se articulan en un modelo integrador. Este modelo permite visualizar la red de objetos y procesos que configuran el holosignificado institucional del concepto y, al mismo tiempo, proporciona criterios para el diseño de entornos de aprendizaje más coherentes con la estructura del conocimiento científico.

5.1. Emergencia y evolución de los significados de la ley de Gauss

El punto de partida del análisis es la constatación de que la ley de Gauss no surge como una proposición aislada, sino como resultado de un proceso histórico de síntesis entre la física empírica y la matemática formal. En el marco de la física clásica, la ley expresa la relación entre el flujo del campo eléctrico a través de una superficie cerrada y la carga eléctrica total contenida en su interior: $\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = q_{in}/\epsilon_0$

Este enunciado, en su forma integral, refleja una idea profundamente geométrica: la conexión entre las propiedades locales del campo y la estructura global del espacio. En su forma diferencial, derivada mediante el teorema de la divergencia, $\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$ la ley adquiere un sentido local que liga el flujo de campo con la densidad de carga en cada punto del espacio.

Sin embargo, detrás de esta formulación compacta se esconden múltiples capas de significado. Los niveles de generalidad —o significados parciales— de la ley de Gauss abarcan desde una simple regla cualitativa hasta una ecuación fundamental del electromagnetismo con un sólido fundamento matemático. Su función evoluciona desde una herramienta computacional aplicable en casos sencillos hasta una descripción fundamental de la relación entre la carga y el campo eléctrico.

5.2. Complejidad epistemológica y cognitiva de la ley de Gauss

El análisis ontosemiótico distingue distintos niveles de complejidad en la ley de Gauss, cada uno de los cuales plantea desafíos específicos para la comprensión y la enseñanza. La complejidad epistemológica deriva de la naturaleza del constructo: su interpretación requiere coordinar modelos geométricos, simbólicos y físicos, así como relacionar la forma integral y diferencial de la ley. El salto entre estos registros demanda no solo competencia matemática, sino también la capacidad de establecer correspondencias semánticas entre expresiones simbólicas y entidades físicas (Duit, 2007).

La complejidad cognitiva, por su parte, se manifiesta en las dificultades que experimentan los estudiantes para conectar la noción de flujo con la de campo y carga. Diversas investigaciones (Baily y Finkelstein, 2010; Singh, 2006; Furió y Guisasola, 1998) han documentado errores persistentes en la interpretación del flujo como “cantidad de campo” o como “número de líneas que pasan”, sin reconocer

su carácter escalar derivado del producto escalar entre el vector campo y el vector normal de superficie. Asimismo, la confusión entre la magnitud local del campo y el flujo total —y entre carga encerrada y carga próxima— evidencia una comprensión fragmentaria del sistema conceptual subyacente.

A esta complejidad se suma la dimensión institucional del conocimiento: los significados que circulan en el aula no siempre coinciden con los significados científicos. En los libros de texto y materiales didácticos, la ley de Gauss suele presentarse como un atajo para calcular campos eléctricos de distribuciones simétricas, lo que refuerza su uso procedimental en detrimento de su interpretación conceptual. Este desajuste entre el significado institucional y el personal genera conflictos semióticos que obstaculizan la construcción del significado global del concepto.

5.3. El holosignificado de la ley de Gauss

El análisis culmina con la propuesta del holosignificado de la ley de Gauss. Este holosignificado constituye una representación integrada de los distintos significados parciales, mostrando cómo se interrelacionan los objetos, procesos y representaciones en un sistema coherente. El holosignificado no se limita a una síntesis descriptiva, sino que actúa como un mapa ecológico del conocimiento, en el que cada significado parcial se entiende como un “nicho” que cumple una función dentro del ecosistema cognitivo y epistemológico. Así, la ley de Gauss puede interpretarse simultáneamente como:

- una relación fenomenológica entre carga y campo (nivel empírico),
- una proporción geométrica entre flujo y superficie (nivel visual),
- una igualdad algebraico-analítica (nivel formal),
- un principio estructural dentro del sistema de Maxwell (nivel teórico), y
- una manifestación de simetría fundamental (nivel metateórico).

El holosignificado refleja la idea de que comprender un concepto científico implica poder moverse con flexibilidad entre estos niveles y reconocer sus interconexiones. En términos de Godino (1994), se trata de una ecología de significados donde cada representación adquiere sentido en función de las prácticas que la sustentan. En el caso de la ley de Gauss, estas prácticas abarcan desde el diseño experimental (medición de cargas y campos) hasta el razonamiento abstracto sobre simetrías y conservación.

5.4. Implicaciones educativas

El reconocimiento de la complejidad ontosemiótica de la ley de Gauss tiene profundas implicaciones para la educación científica. En primer lugar, permite diagnosticar los conflictos semióticos que emergen en el aprendizaje. Muchos errores conceptuales —como confundir flujo con campo, interpretar erróneamente la orientación de las superficies, o aplicar indebidamente la ley en situaciones sin simetría— pueden explicarse como desajustes entre los significados institucionales y personales. Estos conflictos pueden abordarse mediante estrategias didácticas que expliciten los distintos registros semióticos y promuevan su articulación (Guisasola, Zubimendi y Almudí, 2017).

En segundo lugar, el modelo de holosignificado sugiere un diseño curricular basado en la progresividad conceptual. Tal como propone Godino (2025b), la enseñanza puede estructurarse siguiendo una secuencia de niveles de complejidad creciente: comenzar con el estudio cualitativo del campo eléctrico y la relación carga-espacio; introducir después la idea de flujo y simetría; y finalmente abordar la formulación integral y diferencial de la ley. Esta progresión reproduce, en escala didáctica, la evolución histórica y epistemológica del concepto, favoreciendo una comprensión significativa y no meramente algorítmica.

En tercer lugar, el enfoque ontosemiótico impulsa una formación docente reflexiva, que integre la dimensión epistemológica en la práctica pedagógica. El profesorado necesita dominar no solo los

procedimientos de cálculo, sino también los fundamentos teóricos y las limitaciones del modelo, para poder guiar al alumnado en la construcción del sentido. La explicitación del holosignificado actúa aquí como herramienta metacognitiva: permite al docente identificar qué aspectos del significado están siendo movilizados y cuáles permanecen implícitos o ausentes.

Asimismo, el EOS ofrece criterios para diseñar tareas y entornos de aprendizaje que promuevan la conexión entre representaciones. Actividades como la visualización dinámica del flujo mediante simuladores, la exploración de simetrías espaciales y la discusión colectiva sobre la interpretación física de los resultados pueden contribuir a reducir la brecha entre lo matemático y lo fenomenológico. En este sentido, la didáctica inspirada en el EOS se alinea con enfoques contemporáneos de aprendizaje basado en la modelización y en la argumentación científica (Küçüközer y Demirci, 2010; Treagust et al., 2018).

6. Conclusiones y perspectivas futuras

Las distinciones ontosemióticas sobre la carga eléctrica o la ley de Gauss, presentadas en las secciones anteriores, conllevan profundas implicaciones epistemológicas, ya que influyen directamente en la comprensión, la enseñanza, la investigación y la representación de estos constructos en el discurso científico. Nuestro análisis muestra que el conocimiento científico sobre los constructos científicos es complejo, multifacético y está cargado de supuestos ontológicos. Epistemológicamente, esto implica, en primer lugar, que no existe una definición universal de ningún concepto, sino una pluralidad de significados interrelacionados; y, en segundo lugar, que la comprensión de la ciencia requiere la integración de dimensiones ontológicas, semióticas, históricas y filosóficas.

Estas implicaciones son particularmente relevantes en el ámbito de la educación científica, donde la enseñanza de los constructos científicos puede beneficiarse de un enfoque ontosemiótico que haga visible esta complejidad. El modelo ontosemiótico de significados conceptuales propone una visión pragmático-antropológica del conocimiento matemático y científico, que va más allá de la perspectiva reduccionista centrada únicamente en aspectos conceptuales y procedimentales (Hiebert y Lefevre, 1986; McCormick, 1997). Los significados se entienden en términos de sistemas de prácticas, objetos y procesos. Esto tiene claras consecuencias para el diseño educativo en todos los niveles, ya que requiere identificar los tipos de situaciones problemáticas que motivan el uso de los conceptos en diferentes contextos, así como las prácticas operativas y discursivas necesarias para abordarlas. Nuestro enfoque permite reconocer diversos grados de generalidad y complejidad ontosemiótica en los significados parciales en diferentes dominios de uso. Esto facilita el desarrollo de diseños curriculares e instruccionales que se alinean con las capacidades cognitivas del alumnado.

Las teorías de la actividad matemática y del significado del EOS constituyen el fundamento de las teorías propiamente didácticas, es decir, aquellas relativas al diseño educativo, la idoneidad didáctica y el desarrollo profesional docente (véase Figura 1). La aplicación de las herramientas de configuración ontosemiótica y de holosignificado permite acceder a niveles de análisis de los procesos educativos-instruccionales que no están presentes en otras teorías utilizadas en la didáctica de las matemáticas y de las ciencias experimentales. Los distintos tipos de objetos, procesos y significados posibilitan un análisis detallado tanto de las tareas instruccionales planificadas e implementadas como de los procesos de resolución llevados a cabo por los estudiantes, lo que permite caracterizar con precisión tanto la enseñanza como el aprendizaje. Asimismo, la toma de conciencia sobre la complejidad ontosemiótica de las tareas instruccionales facilita adoptar una postura fundamentada frente al dilema entre los modelos educativos constructivistas y transmisivos (Godino y Burgos, 2020).

A nivel filosófico y educativo, destacamos dos conclusiones principales derivadas de este estudio:

Aclaración conceptual. El análisis desde una perspectiva ontosemiótica revela la naturaleza plural y sistémica de cualquier concepto científico o matemático, alejándose de una visión reduccionista.

Por ejemplo, si bien es posible identificar un parecido familiar entre las diversas formas de carga eléctrica, la referencia a una entidad unitaria definible en términos lógicos y semánticos debe complementarse con una perspectiva pragmática. Esta se centra en los usos concretos de cada variedad para resolver problemas del mundo real. Superar las posturas reduccionistas requiere ir más allá del mero constructo conceptual hacia la configuración ontosemiótica de prácticas, objetos y procesos a través de los cuales se articula dicho constructo. Así, la carga eléctrica emerge como una red de configuraciones ontosemióticas esenciales para comprender la complejidad del razonamiento físico.

Conexiones entre constructos y cosas. Los constructos científicos —ya sean abstracciones empíricas o teóricas— no existen independientemente de la actividad humana. Surgen en el contexto de prácticas científicas orientadas a la resolución de problemas, mediadas por lenguajes, representaciones y artefactos simbólicos, materiales y tecnológicos que nos permiten describir y actuar sobre el mundo. Por ejemplo, el concepto de carga eléctrica no puede entenderse como una mera magnitud abstracta ni como una entidad descubierta en la naturaleza: su significado pleno reside en la actividad intencional de físicos, ingenieros y otros agentes epistémicos que lo construyen, transforman y aplican mediante prácticas discursivas, modelos matemáticos, instrumentos de medición y marcos interpretativos.

El análisis ontosemiótico también es aplicable a otros conceptos fundamentales de la física, como masa, fuerza o campo, y, de forma más amplia, a cualquier constructo científico o matemático. Identificar los diferentes contextos en los que se utiliza un constructo, junto con las prácticas, objetos y procesos implicados en la resolución de problemas, permite aclarar los diversos significados que adopta y las formas en que estos se articulan. Esta aclaración es esencial para abordar los conflictos y dilemas que surgen en la construcción, interpretación y comunicación del conocimiento científico.

Una vía prometedora para la investigación futura es la aplicación del EOS a la interacción persona-computadora en aulas de ciencias y matemáticas mediadas por inteligencia artificial. Herramientas analíticas como la configuración ontosemiótica y la idoneidad didáctica proporcionan un marco para examinar cómo docentes y estudiantes interactúan con objetos emergentes —como la retroalimentación automatizada o las representaciones dinámicas— y para evaluar su impacto en la construcción de significado, la comprensión conceptual, la autonomía del estudiante y las dimensiones éticas de la enseñanza. Desde esta perspectiva, el EOS puede ayudar a identificar oportunidades y riesgos en la integración de la IA, ofreciendo un terreno fértil para comprender cómo se transforman las prácticas educativas en entornos híbridos donde se negocian significados entre humanos y artefactos inteligentes.

Referencias

- Badillo, E., Font, V. & Azcárate, C. (2005). Conflictos semióticos relacionados con el uso de la notación incremental y diferencial en libros de física y de matemáticas del bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias, Número Extra*, VII Congreso, 1-6.
- Baily, C., & Finkelstein, N. D. (2010). Reflections on modern physics: Insights from upper-division students. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 6(1), 010113.
- Bodner, G. M., & Orgill, M. (Eds.). (2007). *Theoretical frameworks for research in chemistry/science education*. Pearson Prentice Hall.
- Buchwald, J. Z. (2013a). Electricity and magnetism to Volta. En J. Z. Buchwald & R. Fox (Eds.), *The Oxford handbook of the history of physics* (pp. 432–442). Oxford University Press.
- Buchwald, J. Z. (2013b). Electrodynamics from Thomson and Maxwell to Hertz. En J. Z. Buchwald & R. Fox (Eds.), *The Oxford handbook of the history of physics* (pp. 432–442). Oxford University Press.
- Darrigol, O. (2000). *Electrodynamics from Ampère to Einstein*. Oxford University Press.

- Deng, Z. (2018). Pedagogical content knowledge reconceived: Bringing curriculum thinking into the conversation on teachers' content knowledge. *Teaching and Teacher Education*, 72, 155–164.
- Doménech, J. L., Gil-Pérez, D., Gras, A., Guisasola, J., Martínez-Torregrosa, J., Salinas, J., Trumper, R., & Valdés, P. (2003). La enseñanza de la energía: una propuesta de debate para un replanteamiento global. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 20(3), 285–311.
- Duit, R. (2007). Science education research internationally: Conceptions, research methods, domains of research. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 3(1), 3–15. <https://doi.org/10.12973/ejmste/75371>
- Faraday, M. (1852). *Experimental researches in electricity*. Royal Society of London.
- Feynman, R. (2005). *El carácter de la ley física*. Tusquets Editores.
- Font, V., Godino, J. D., & D'amore, B. (2007). An onto-semiotic approach to representations in mathematics education. *For the learning of mathematics*, 27(2), 2-14.
- Font, V., Godino, J. D., & Gallardo, J. (2013). The emergence of objects from mathematical practices. *Educational Studies in Mathematics*, 82, 97-124. <http://dx.doi.org/10.1007/s10649-012-9411-0>
- Furió, C., & Guisasola, J. (1998). Difficulties in learning the concept of electric field. *Science Education*, 82(4), 511–526.
- Gess-Newsome, J., Taylor, J. A., Carlson, J., Gardner, A. L., Wilson, C. D., & Stuhlsatz, M. A. M. (2017). Teacher pedagogical content knowledge, practice, and student achievement. *International Journal of Science Education*, 1–20.
- Godino, J. D. (1994). Ecology of mathematical knowledge: An alternative vision of the popularization of mathematics. En *First European Congress of Mathematics* (Vol. 3, pp. 150–156). Birkhäuser.
- Godino, J. D. (2023). Onto-semiotic approach to the philosophy of educational mathematics. *Revista Paradigma*, Vol. XLIV, 7-33.
- Godino, J. D. (2024). *Onto-semiotic approach in mathematics education. Foundations, tools, and applications*. DIGIBUG Author edition. <https://hdl.handle.net/10481/93738>
- Godino, J. D. (2025a). Hybridisation and networking of theories: The case of the ontosemiotic approach in mathematics education. *Éducation et didactique*, 19 (1), 71-86.
- Godino, J. D. (2025b). Análisis ontosemiótico de la emergencia y evolución del concepto de carga eléctrica. *Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias (REIEC)* (Aceptado).
- Godino, J. D. (2025c). Onto-semiotic complexity of Gauss's law for the electric field. *Acta Scientiae* (En revision).
- Godino, J. D. & Batanero, C. (1998). Clarifying the meaning of mathematical objects as a priority area of research in Mathematics Education. En A. Sierpinska & J. Kilpatrick (Ed.), *Mathematics education as a research domain: A search for identity* (pp. 177-195). Dordrecht: Kluwer, A. P.
- Godino, J. D. & Burgos, M. (2020). Interweaving transmission and inquiry in mathematics and sciences instruction. En K. O. Villalba-Condori et al. (Eds.), *CISETC 2019, CCIS 1191* (pp. 6–21). Springer Nature Switzerland AG. The final publication is available at https://doi.org/10.1007/978-3-030-45344-2_2
- Godino, J. D., Batanero, C. & Burgos, M. (2023). Theory of didactical suitability: An enlarged view of the quality of mathematics instruction. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 19(6), em2270. <https://doi.org/10.29333/ejmste/13187>
- Godino, J. D., Batanero, C., & Font, V. (2007). The onto-semiotic approach to research in mathematics education. *ZDM – The International Journal on Mathematics Education*, 39(1–2), 127–135.
- Guisasola, J., Zubimendi, J. L., & Almudí, J. M. (2017). Dificultades persistentes de los estudiantes en la comprensión del campo eléctrico y la ley de Gauss. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 39(3), e3306. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0306>

- Guisasola, J., Zubimendi, J. L., Almudí, J. M., & Ceberio, M. (2008). Dificultades persistentes en el aprendizaje de la electricidad. *Enseñanza de las Ciencias*, 177–192.
- Heilbron, J. L. (1979). *Electricity in the 17th and 18th centuries: A study of early modern physics*. University of California Press.
- Hiebert, J., & Lefevre, P. (1986). Conceptual and procedural knowledge in mathematics: An introductory analysis. En Hiebert (Ed.), *Procedural and conceptual knowledge: The case of mathematics* (pp. 1–27). Lawrence Erlbaum Associates.
- Kragh, H. (2001). *Quantum generations: A history of physics in the twentieth century*. Princeton University Press.
- Küçüközer, H., & Demirci, N. (2010). Exploring physics teachers' understanding of electric field lines. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 8(6), 1031–1051.
- McCormick, R. (1997). Conceptual and procedural knowledge. *International Journal of Technology and Design Education* 7, 141–159. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1008819912213>
- Mnguni, L. (2021). Strategies for the development and application of research frameworks in science education research. *Journal of Educational and Social Research*, 11(5), 123–134. <https://doi.org/10.36941/jesr-2021-0123>
- Moreno, N., Font, V. y Ramírez, M. J. C. (2016). La importancia de los diagramas en la resolución de problemas de cuerpos deformables en Mecánica: el caso de la fuerza de fricción. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 24(1), 158-172.
- Moreno, N., Hernández, L. E. y Briceño, E. C. (2021). Análisis de la resolución de un problema de cinemática mediante el mapa conceptual híbrido. *Enseñanza de las Ciencias*, 39(3), 157-176.
- Moreno, N., Ramírez, B. R. y Torres, R. de G. (2021). Los mapas híbridos en la química escolar. *Educación Química*, 32(3). <http://dx.doi.org/10.22201/fq.18708404e.2021.3.77443>
- Nair, V. P. (2005). *Quantum field theory: A modern perspective*. Springer.
- Parra, F. J. y Ávila, R. (2015). Hacia una idoneidad didáctica en una clase de Física. *Revista Mexicana de Física*, 61(4).
- Peirce, C. S. (1931–1958). *Collected Papers of Charles Sanders Peirce*. Harvard University Press.
- Rheinberger, H.-J. (2010). *On historicizing epistemology: An essay*. Stanford University Press.
- Sfard, A. (2008). *Thinking as communicating: human development, the growth of discourses, and mathematizing*. Cambridge University Press.
- Singh, C. (2006). Student understanding of symmetry and Gauss's law of electricity. *American Journal of Physics*, 74(10), 923–936. <https://doi.org/10.1119/1.2238889>
- Spangler, D. A., & Williams, S. R. (2019). The role of theoretical frameworks in mathematics education research. En K. R. Leatham (Ed.), *Designing, conducting, and publishing quality research in mathematics education* (pp. 3–16). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23505-5_1
- Stocklmayer, S. M., & Treagust, D. F. (1994). A historical analysis of electric currents in textbooks: A century of influence on physics education. *Science & Education*, 3, 131–154.
- Stoilescu, D. (2021). Aspects of theories, frameworks and paradigms in mathematics education research. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 9(2), 51–61. <https://doi.org/10.30935/scimath/10800>
- Treagust, D. F., Duit, R., & Fischer, H. E. (Eds.). (2018). *Multiple representations in physics education*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58914-5>
- Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society. Development of higher psychological processes*. Harvard University Press.

- Whittaker, E. (1951). *A history of the theories of aether and electricity: The classical theories*. Thomas Nelson and Son.
- Whittaker, E. (1953). *A history of the theories of aether and electricity: The modern theories (1900–1926)*. Thomas Nelson and Son.
- Wittgenstein, L. (1953). *Philosophical investigations*. Basil Blackwell.
- Zee, A. (2003). *Quantum field theory in a nutshell*. Princeton University Press.