

Conformación de un espacio de aprendizaje para el abordaje computacional de problemas de la física y otras disciplinas

LUIS P. LARA, HUGO D. NAVONE Y PABLO A. TURNER

DEPARTAMENTO DE FÍSICA - ESCUELA DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES - FCEIYA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO
PELLEGRINI 250 - (2000) ROSARIO - REPÚBLICA ARGENTINA
e-mail: hugo@ifir.edu.ar

Resumen

El rol de los recursos informáticos en el desarrollo de las diversas disciplinas científicas ha originado nuevos enfoques en el tratamiento y en la resolución de los problemas derivados de las mismas. Más aún, la complejidad de los distintos sistemas que hoy se estudian exige una formulación, en muchos casos, estrictamente algorítmica. Pero este desarrollo en el campo profesional no ha modificado el abordaje de la enseñanza de las ciencias en general y de la física en particular.

En este trabajo se presenta una experiencia en desarrollo cuyo objetivo es incorporar la formulación algorítmica en el análisis de los fenómenos físicos. En particular, se describe la conformación y características de un espacio de aprendizaje para el logro de este objetivo.

Introducción

Hasta hace poco tiempo el abordaje de las distintas problemáticas en el campo de las ciencias podía categorizarse, de acuerdo a la metodología empleada en el análisis de los sistemas en estudio, en: “experimental” y “teórico”. Durante los últimos 30 años se ha ido desarrollando una nueva forma de trabajo que no puede categorizarse de dicha manera, ya que, en el sentido estricto de ambos enfoques, no interactúa con los sistemas reales, ni construye formulaciones teóricas. Este nuevo punto de vista muchas veces se ha definido como “ciencia computacional” y, en el caso particular de la física, como “física computacional”. La física computacional es una síntesis de análisis teórico, algoritmos numéricos y programación, la cual provee una aproximación alternativa al estudio de la física, complementando las aproximaciones tradicionales: física teórica y física experimental. En el contexto de la aproximación computacional, el análisis de los distintos sistemas en estudio se efectúa mediante una formulación algorítmica de los mismos, y la computadora es el aparato con el cual se realizan los experimentos (o simulaciones) computacionales. Estas tres formas (experimental, teórica y computacional) de abordar la problemática científica no están aisladas unas de otras, más aún, la interacción entre ellas es crucial para el avance del conocimiento.

Desde el enfoque experimental se realizan experimentos para extraer información sobre el sistema en estudio (datos) y desde el enfoque teórico, se construyen modelos a partir de postulados y leyes preexistentes. En general, se comparan los resultados teóricos con los experimentales, lo que da lugar a nuevos experimentos y a otras formulaciones teóricas. El éxito del desarrollo de la ciencia, abordando su problemática con este método, es indiscutible. Sin embargo, en casi todos los campos de la física, el análisis teórico tradicional de una situación física resulta en una descripción matemática. Algunas de estos modelos pueden resolverse exactamente, pero en la mayoría de los casos esto no es posible y deben realizarse aproximaciones, las cuales a su vez no siempre son factibles de ser resueltas analíticamente. Por ejemplo: ecuaciones no lineales son linealizadas, minimizando la magnitud de los términos no lineales, a través de transformaciones. Este proceso ha permitido tratar con éxito muchos problemas, sin embargo, fenómenos interesantes son ocultados en el proceso de descartar los términos no lineales. En tales problemas, la actual disponibilidad de computadoras, permite evitar dicho tipo de aproximaciones y es posible retener la riqueza de una descripción más realista de la situación física. Por otra parte, el uso de una computadora para evaluar numéricamente las expresiones matemáticas de una formulación puede ser conveniente, pero si dichas expresiones deben ser calculadas cientos de miles de veces, luego el uso de la computadora es absolutamente necesario. Esta integración del cálculo computacional a la resolución de problemas físicos indica claramente que en la actualidad la computadora no es más una herramienta para hacer “las mismas viejas cosas mejor y más rápido”, sino que introduce una nueva perspectiva en la construcción del conocimiento científico (DeVries [1996]).

En el caso particular de la física, la perspectiva dada por el enfoque computacional ha permitido abordar una amplia variedad de problemas, algunos de los cuales constituyen un nuevo paradigma en las ciencias físicas. Ejemplos de los mismos son: dinámica de fluidos, física estadística, física del plasma (fusión y astrofísica), termodinámica de fenómenos irreversibles, entre otros, los cuales pueden ser abordados mediante implementaciones numéricas de las descripciones matemáticas del modelo, o también, mediante formulaciones algorítmicas a partir del comportamiento intrínseco de los sistemas, las cuales conforman el enfoque habitual en “sistemas complejos”. Es precisamente en el campo de los sistemas complejos donde desaparecen las fronteras entre las distintas disciplinas y, en particular, se

hace imprescindible la interacción entre estas y las ciencias de la computación (Browne [1996], Noam [1995]). La dinámica impuesta por el desarrollo de la ciencia computacional hace prácticamente imposible su incorporación en la actual estructura de cursos de las diferentes carreras científicas y es, por ende, necesario generar un espacio que permita la incorporación del enfoque computacional. Dicho espacio debe ser lo suficientemente flexible como para contener: los tópicos tradicionales y aquellos que surgen del avance del nuevo enfoque. Esto presenta la problemática de resolver, en una primera etapa de transición, la generación de dicho espacio sin requerir la modificación de la curricula de las carreras. En este trabajo se proponen dos alternativas: la primera es la construcción de un espacio propio para los nuevos tópicos de la física computacional en el marco de las materias de grado habitualmente destinadas a Computación y Cálculo Numérico, y la segunda consiste en incorporar en cada materia el enfoque computacional en la resolución de problemas. En esta propuesta ambas alternativas no se excluyen sino que se complementan, independientemente de la etapa de desarrollo en que cada uno de ellas se encuentre.

Conformación del espacio de aprendizaje

A partir de lo expuesto, el desarrollo de la tecnología informática debe necesariamente modificar la enseñanza de las ciencias, y de la física en particular. Los cambios en la forma de atacar los problemas propios de la disciplina en cuestión a nivel profesional comienzan a impulsar la revisión de los programas y currículums tradicionales a partir de este nuevo punto de vista.

Pero estas modificaciones a nivel curricular deben ser acompañadas por cambios en la metodología de trabajo en el aula y por la construcción de espacios de aprendizaje que permitan explotar al máximo la potencialidad de esta herramienta en el estudio y análisis de las distintas problemáticas científicas. Con este espíritu y en el contexto de una disciplina en particular, la física, se proponen una serie de estrategias que conforman y caracterizan un espacio de aprendizaje posible.

Por lo tanto y en primer lugar, se hace necesario definir la idea de espacio de aprendizaje y los alcances y significaciones que adquiere en este trabajo. Dado que el enfoque algorítmico en la resolución de las diversas problemáticas derivadas de la física excede el marco de una materia en particular constituyéndose en una nueva metodología, se hace necesario utilizar definiciones más abarcativas. Esto último modifica tanto la construcción del conocimiento científico y aplicado como el proceso de enseñanza-aprendizaje de los conceptos de esta disciplina. Es desde esta perspectiva que en este trabajo utilizamos el concepto de “espacio de aprendizaje” para referirnos, en líneas generales, al conjunto de recursos dispuestos al alcance de los alumnos y profesores con el objetivo de posibilitar el acceso a esta herramienta de desarrollo profesional y educativo. Los recursos que constituyen y definen el espacio de aprendizaje propuesto en esta experiencia tienen como eje de desarrollo cátedras específicas, instancias educativas extracurriculares y metodologías de trabajo asociadas a cada una de ellas.

Desde el punto de vista de las propuestas curriculares, desde el año 1989 en la carrera de Lic. en Física de la Universidad Nacional de Rosario existe el curso de *Computación y Cálculo Numérico* en el 3er. año de la misma. Este curso es el único que pertenece al plan de estudios de dicha carrera como materia obligatoria. Pero dada la importancia que fue adquiriendo el enfoque computacional en las distintas especialidades profesionales, este curso se constituyó en el generador natural de otros dos cursos a los efectos de brindar a los estudiantes la posibilidad de acceder a una nueva metodología de análisis de los problemas de la física y por consiguiente lograr una mejor formación profesional. Es así como se implementa otro curso curricular, de

carácter optativo, en el 5to. año de la carrera denominado *Cálculo Numérico y Modelos Matemáticos*. Por otra parte, a los efectos de que los estudiantes vayan incorporando gradualmente y a lo largo de toda la carrera el enfoque algorítmico en el tratamiento de los problemas vinculados a las diferentes materias se implementó un *Taller de Física Computacional* con carácter optativo y extracurricular para los alumnos de 2do. año.

Además de la estructura de cursos descripta, se propusieron otras instancias educativas a los efectos de que los alumnos puedan profundizar, a través del enfoque algorítmico, distintas problemáticas de acuerdo a sus propias inquietudes e intereses. A tal efecto se implementan adscripciones, se pone a disposición de los alumnos el laboratorio de informática de la cátedra de Computación y Cálculo Numérico, y se comienzan a desarrollar algunos proyectos en común con otras cátedras incorporando el enfoque algorítmico en las materias de la carrera que así lo requieran.

Cabe remarcar también que en este trabajo cuando se menciona a la formulación algorítmica como metodología de trabajo en el análisis y resolución de problemas se hace referencia a una definición mucho más amplia de lo que usualmente denominamos como programación. Se entiende que el abordaje algorítmico consiste en expresar un problema, independientemente de su origen, en términos "computables", es decir entendibles por una computadora (DeVries [1996]). De esta definición se desprende que la plataforma utilizada para la expresión o formulación computacional puede ser un lenguaje de programación convencional (FORTRAN, C, Pascal, Basic, etc.) o cualquier otro ambiente de desarrollo adecuado al tipo de problema que se quiere resolver (Planilla de Cálculo, MathCad, Derive, Mathematica, etc.). La amplitud de esta definición conduce a otro tipo de problemática que también se trata de resolver en este espacio de aprendizaje: la exploración de distintas plataformas o ambientes para la formulación algorítmica de problemas y la determinación de sus alcances y limitaciones. Es decir, mientras que en el enfoque analítico tradicional se trata de elegir las aproximaciones apropiadas que conduzcan a la resolución de un problema, lo que implica un cierto recorte de la realidad, en el abordaje algorítmico se trata de crear o implementar estrategias de cálculo sobre plataformas computacionales adecuadas al problema en cuestión (DeVries [1996]).

A continuación se describe brevemente las características más relevantes de cada una de las instancias educativas mencionadas.

Taller de Física Computacional

Este taller está destinado a alumnos de 2º año de la carrera de Licenciatura en Física. Los objetivos del mismo se pueden resumir en los siguientes:

- 1- Brindar una formación conceptual básica en el uso de la tecnología informática que le permita a los alumnos descubrir progresivamente sus potenciales aplicaciones en el ámbito educativo y profesional.
- 2- Dar comienzo al proceso de incorporación de la informática como herramienta para el desarrollo educativo a lo largo del cursado de la carrera de Licenciatura en Física.
- 3- Poner al alcance de los alumnos "entornos de trabajo computacionales" (Planillas de Cálculo, MathCad y Derive) para la formulación algorítmica de problemas que les permitan abordar con mayor claridad y profundidad los temas pertenecientes a las distintas materias.
- 4- Complementar el enfoque estrictamente analítico de problemas mediante su resolución numérica, poniendo de manifiesto las simplificaciones realizadas tanto en el campo analítico como en el numérico.
- 5- Introducir los conceptos y la terminología básica necesaria para el desarrollo de la materia de grado correspondiente al 3º año de la carrera.

Dado que la incorporación de los recursos informáticos en el nivel medio no constituye una situación generalizada en nuestro sistema educativo, en este curso se trata de brindar los aspectos básicos para la interacción con una computadora a los efectos de nivelar a los alumnos que acceden en el uso de esta herramienta. Por otra parte, dado que algunos alumnos ya tienen algún conocimiento sobre el tema y teniendo en cuenta que esta es una propuesta extracurricular y optativa, el Taller de Física Computacional se divide en módulos que abarcan distintas áreas temáticas. De esta manera los alumnos pueden acceder a aquellos módulos que les interesan y descartar los que ya conocen, es decir, pueden trazar su propia currícula temática.

De acuerdo con esto, en primer lugar se trabaja con los aspectos básicos del uso de esta tecnología vinculados a la gestión y administración de la información, ya sea a través del sistema operativo o usando aplicaciones específicas. Luego se los introduce rápidamente en el procesamiento de documentos y gráficos para que sean capaces de armar informes y trabajos con composición de textos y figuras.

A partir de aquí, la implementación de este taller se basa fundamentalmente en la introducción de entornos de trabajo de propósito general como Planillas de Cálculo y ambientes de desarrollo matemático como MathCad y Derive. Estos entornos permiten que los alumnos resuelvan problemas fisico-matemáticos sencillos, indagando y profundizando en los mismos de acuerdo a sus propios intereses e inquietudes. Para lograr esto, el docente introduce cada uno de estos ambientes trabajando con los conceptos y definiciones generales que posibilitan su uso. La clase se divide en grupos pequeños de alumnos y el proceso de enseñanza-aprendizaje se realiza directamente frente a la computadora. En este taller, por lo tanto, no se estructuran clases de teoría, práctica o laboratorio, sino que todos los temas se desarrollan en el ámbito del Laboratorio de Informática. Esto permite explotar a fondo las posibilidades de la computadora y la creatividad de los alumnos. El Derive es adecuado para presentar un ambiente de trabajo destinado fundamentalmente a la resolución simbólica de problemas, mientras que el MathCad es un ambiente dirigido hacia la resolución numérica de los mismos. En la medida de lo posible, en ambos ambientes se trata de visualizar gráficamente los resultados de los problemas. Cabe destacar que el entorno MathCad ha resultado muy amigable para la introducción de ciertos conceptos que luego serán necesarios en la enseñanza de un lenguaje de programación. Entre dichos conceptos podemos citar como ejemplos: variables, tipos de variables, operadores de definición, expresiones, operadores y reglas de precedencia, arreglos, funciones internas del entorno, definición de funciones por parte del usuario, definiciones locales y globales, facilidades de edición, manejo de archivos, iteraciones, evaluación de predicados lógicos, ejecución secuencial, etc. La mayoría de estos conceptos también aparecen en el entorno Derive pero al ser un ambiente al que recurrimos para la resolución simbólica, los mismos se presentan de forma natural en correspondencia con la física-matemática.

Computación y Cálculo Numérico

El objetivo básico de este curso es garantizar un nivel mínimo de formación para que los alumnos sean competentes en la formulación e implementación de algoritmos en un lenguaje de programación. Para ello se trabaja con problemas derivados de la física, complementando de esta manera el enfoque estrictamente analítico y explorando en alguna medida el campo de la física computacional.

La materia de Computación y Cálculo Numérico es el único de los tres cursos que se describen en este trabajo que pertenece al conjunto de materias regulares de la currícula de la

Licenciatura en Física de la UNR. Dicho curso se dicta en el 3° año de la carrera, y los alumnos ya cuentan con la formación y los conocimientos de física adquiridos en las físicas básicas de 1° y 2° año. Al ser una materia regular de la carrera, los temas de física que se incluyen y las herramientas de computación y cálculo numérico que se dictan poseen un alcance fijo con el fin de homogeneizar los conocimientos adquiridos por los alumnos al finalizar el cursado.

En esta asignatura, durante la primera mitad del cuatrimestre, se introducen los conceptos necesarios para la interacción con un ambiente informático y se trabaja con las estructuras lógicas fundamentales para el diseño de algoritmos y su codificación en un lenguaje de programación. Actualmente, el sistema operativo que se utiliza es el MSDOS (sobre plataforma PC compatible) y el lenguaje de programación que se introduce es el FORTRAN 77. Las estructuras lógicas para la codificación de los algoritmos se presentan de forma general, usando lo que habitualmente se denomina pseudocódigo. Para el trabajo con FORTRAN se proponen clases en las cuales se establece un paralelismo entre el pseudocódigo y dicho lenguaje de bajo nivel (Braunstein y Gioia [1987]). Esta generalidad en el tratamiento del lenguaje de codificación les da a los alumnos la posibilidad de acceder a otros lenguajes según sean las necesidades de su futura labor de investigación y le brinda al docente una herramienta didáctica para el abordaje de esta temática.

La segunda mitad del cuatrimestre se dedica a la enseñanza de los principales conceptos y métodos del cálculo numérico: errores, valuación de funciones, raíces de ecuaciones, interpolación y ajuste, integración y resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias (Nakamura [1992], Henrici [1972], Conte y de Boor [1974], Mc Craken y Dorn [1970] y Ralston [1970]). Durante el dictado de estos temas no se plantean en forma separada clases de teoría, práctica y laboratorio, sino que se introducen brevemente los temas e inmediatamente se recurre a problemas físicos para discutir y valorar el alcance de cada uno de los métodos.

Cálculo Numérico y Modelos Matemáticos

Esta materia tiene una doble finalidad: constituye un curso optativo para los alumnos de 5° año de la Licenciatura en Física y además es un curso de posgrado para graduados en Física y para los de cualquier otra disciplina en donde sea necesario profundizar en este campo. A los estudiantes de Física les permite completar su formación básica alcanzada en el curso de grado, abarcando temas y metodologías más cercanas al trabajo profesional como físicos. Para los graduados en otras disciplinas, este es un curso destinado a afianzar su formación en el abordaje algorítmico de problemas y les permite evaluar las diversas técnicas y métodos que más se adecuan a sus problemáticas particulares. Además, se les brinda un espacio para que planteen problemas derivados de sus áreas de trabajo específicas, lo que contribuye al enriquecimiento de todos los alumnos y a su vez de la cátedra.

En este curso se tratan de explorar, más concretamente, tópicos específicos de la física computacional y abordar desde la física problemáticas compartidas con otras ciencias en general y con las Ciencias de la Computación en particular. Es así como se realiza un recorrido general por distintos ambientes de trabajo en informática: sistemas operativos, ambientes para el desarrollo de aplicaciones y lenguajes de programación, tratando de establecer los alcances y las limitaciones de cada uno de ellos. Se trabajan los conceptos fundamentales relacionados con la codificación de algoritmos desde un punto de vista más formal y se hace un recorrido sobre lenguajes de programación con distintos niveles de abstracción.

Teniendo en cuenta las características de este curso, a medida que se desarrollan los temas vinculados al análisis numérico, se introduce un lenguaje para la codificación de algoritmos de

propósito general como es el lenguaje C. De esta forma, los alumnos incorporan los elementos fundamentales del lenguaje de programación a medida que van resolviendo los problemas que se les plantean desde el ámbito de la física computacional. Por otra parte, siempre se deja abierta la posibilidad de que los alumnos recurran a distintos ambientes de desarrollo para la formulación de sus algoritmos a los efectos de que puedan hacer una evaluación de la plataforma computacional más adecuada para la resolución de un problema determinado. Con este espíritu, también se promueve el uso de bibliotecas de subrutinas científicas.

Durante el cursado de la materia se propone el desarrollo de trabajos prácticos cuyo objetivo fundamental es la realización de experimentos numéricos a los efectos de abordar el problema dado desde una perspectiva computacional. Estos trabajos se exponen y discuten en clase, lo que contribuye al enriquecimiento general del curso generando nuevas problemáticas y perspectivas de análisis.

Algunos de los trabajos prácticos que se desarrollan son los siguientes: codificación de algoritmos simples en lenguajes de programación con distintos niveles de abstracción, representación interna de la información y errores, generación de números aleatorios con diferentes distribuciones de probabilidad, integración por Monte Carlo y oscilaciones. En particular, este último, permite introducir a los alumnos en el análisis de sistemas dinámicos cuyo comportamiento es caótico (mapa de las fases, dependencia de las condiciones iniciales, mapa de Poincare, etc.) (Bergé et al. [1984], Castillo Douglas et al. [1994]). También se atacan problemas de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

Es necesario considerar que este curso completa por un lado la formación en análisis numérico tradicional, ya que en él se consideran temas como métodos de resolución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, pero por otra parte, abre las puertas hacia nuevas temáticas relacionadas con la simulación numérica de sistemas y con el análisis de sistemas dinámicos. Dadas sus características y el lugar que ocupa en la carrera, este curso está sujeto a continuas revisiones en consonancia con los temas de análisis numérico que no alcanzan a verse en la materia de grado y por otro lado con temas que exceden también el campo de la física computacional para entrar en un terreno interdisciplinario y vinculado estrechamente a las Ciencias de la Computación (Browne [1996]).

Adscripciones

Esta es una instancia educativa extracurricular y optativa para aquellos alumnos más interesados en los temas relacionados con el ámbito de la física computacional. Abarca la exploración de nuevas herramientas para la formulación algorítmica de problemas, tanto en el campo educativo como en el profesional, y permite el abordaje de problemáticas que van más allá de los temas propuestos en las currículas de los cursos descriptos.

La existencia de esta propuesta educativa contribuye a enriquecer el espacio de aprendizaje, flexibilizando la oferta de temas y herramientas al brindar un ámbito de libre desarrollo. Dependiendo de la problemática en particular, las adscripciones tienen un cierto umbral para su acceso pero no tienen las limitaciones que impone el abordaje de un tema en el desarrollo de un curso específico. También constituyen una herramienta para los docentes ya que les permite explorar nuevos recursos educativos y temáticas que pueden, en algún momento, ser incorporadas a algunos de los cursos propuestos o puestas a disposición de otras cátedras de la carrera. Este último aspecto se pone de manifiesto especialmente ante los alumnos ya que contribuye a darle una mayor significación al trabajo que desarrollan, dado que no sólo es parte de su formación sino que potencialmente puede contribuir a la formación de otros.

Como ejemplo de los dos tipos de adscripciones descritas podemos citar las siguientes: en el campo de las nuevas herramientas para el desarrollo educativo se estudió el entorno Mathematica y sus diversos aspectos para la resolución de problemas derivados de la física (Id Betan [1995]); en el terreno de la física computacional se estudió el comportamiento del péndulo paramétrico mediante la simulación numérica de un dispositivo experimental (Verdes *et al* [1995]).

Laboratorio abierto

La dinámica impuesta por el desarrollo de adscripciones y los cursos extracurriculares y optativos generó la necesidad de mantener un espacio abierto para la exploración de las distintas temáticas destinado a los alumnos. El objetivo es que se apropien de este ámbito trabajando por su cuenta, y que recurran a los docentes cuando lo consideren necesario. El rol docente en este caso asume diferentes facetas según la demanda de los propios alumnos, abarcando desde un papel "directivo" o "conductor" hasta "facilitador" de la problemática abordada. El desarrollo de esta instancia educativa depende fundamentalmente de los recursos materiales y humanos disponibles.

Trabajos con otras cátedras

Dado que la formulación algorítmica es una nueva metodología en el abordaje de los problemas físicos, en conjunto con el abordaje teórico y el enfoque experimental, se hace cada vez más necesario interaccionar con las diferentes cátedras de la carrera a los efectos de mancomunar esfuerzos para la incorporación de tópicos de física computacional. Ejemplos de esta interacción lo constituyen el uso de software demostrativo desarrollado por la cátedra (Lara *et al.* [1995]) para su uso en las físicas básicas y un código para el cálculo de diagrama de fase (Lebensohn *et al.* [1996]).

Esta temática recién comienza a abordarse y es de esperar que vaya evolucionando en el tiempo hasta que haya una incorporación efectiva del enfoque computacional en cada una de las materias de nuestra carrera. Esto por supuesto implica necesariamente un continuo replanteo del espacio de aprendizaje propuesto a partir de los cursos y cátedras planteados en este trabajo.

Conclusiones

La experiencia que hemos expuesto en este trabajo no pretende tener el alcance de un cambio abrupto sino que traza una estrategia para incorporar progresivamente el enfoque computacional en el abordaje de los problemas físicos, complementando y unificando los enfoques teóricos y experimental. Además la generación de un espacio propio permite abarcar temáticas actuales de la física en general y de la física computacional en particular. Por último, dado que la problemática a la que responde esta experiencia excede el marco de una carrera en particular se propone que la misma puede constituirse en un posible ejemplo generador de distintos espacios de aprendizaje en otras disciplinas.

Referencias

- Bergé, P., Pomenau, Y. and Vidal, C. "Order within chaos" (1984) John Wiley & Sons, Paris - Francia
- Braunstein, S.L. y Gioia, A.B., "Introducción a la programación y a las estructuras de datos" (1987) EUDEBA, Buenos Aires - Argentina
- Browne, J.C., Computers in Physics, 10, 1, 5 (1996).
- Castillo Douglas, S., Harrison, D.M and Shepherd, T.G., Computer in Physics 8 N°4 (1994) 416

- Conte, S.D. y de Boor, C., "Análisis numérico elemental" (1974) Mc Graw-Hill de México
- DeVries, P.L., Am. J. Phys. 64, 4, 364-368 (1996).
- Henrici, P., "Elementos de análisis numérico" (1972) Editorial Trillas - México
- Id Betan, R., "Exploración del entorno Mathematica", Informe de la Adscripción desarrollada en la Cátedra de Computación y Cálculo Numérico, Departamento de Física, Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, UNR, (1995).
- Kadanoff, L.P., Physic Today 41 N°12 (1988) 9
- Lara, L.P, Sepiarsky, M. y Ibaceta, D. *Programas demostrativos de fenómenos físicos* Depto de Física - FCEIyA - UNR (1995).
- Lebensohn, R.A., Navone, H.D. y Turner, P.A. *Cálculo de diagramas de fase sobre bases termodinámicas* Depto de Física - FCEIyA - UNR (1996).
- Mc Craken, D.D. y Dorn, W.S., "Métodos numéricos y programación FORTRAN" (1970) Limusa - México
- Nakamura, S., "Métodos numéricos aplicados con software" (1992) Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., México
- Noam, E.M., Science, 270, 247 (1995).
- Ralston, A., "Introducción al análisis numérico" (1970) Limusa - México
- Riddle, A., IEEE Spectrum 31 N°11 (1994) 35
- Verdes, P.F., Navone H.D., Turner P.A. y Lara L.P., "Estudio numérico comparativo del péndulo paramétrico: teórico y experimental", 80a. Reunión Nacional de Física, San Carlos de Bariloche (1995).
- Wilson, J.M. and Redish, E.F., Physics Today 42 N°1 (1989) 34.