

Métodos Científicos del Ámbito Computacional en la Enseñanza de la Ingeniería

Raúl Alberto Dean

Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto
Ruta Nac. 36 – km 601. (X5804BYA) Río Cuarto. e-mail: rdean@ing.unrc.edu.ar

RESUMEN

Las actividades de investigación y/o diseño en las ciencias de lo artificial se desarrollan actualmente en gran parte con el aporte de simulaciones computacionales. En las actividades desarrolladas mediante códigos computacionales, y desde la perspectiva de los contextos de la práctica científica, verificación y validación (V&V) pueden ser considerados métodos primarios de evaluación pertenecientes al contexto de justificación del conocimiento y calibración como un método perteneciente al contexto de modelación. El trabajo trata sobre la inserción de los conceptos de V&V y de calibración en la enseñanza de la ingeniería utilizando una perspectiva epistemológica y metodológica. La misma fue incorporada a partir del año 2004 en cursos de posgrado, en donde se tomaron como base los conceptos de V&V establecidos por el comité de Normas de la Dinámica de Fluidos Computacional de la *American Institute of Aeronautics and Astronautics* (AIAA). Se sostiene que el presente trabajo aporta al análisis crítico para consensuar los conceptos a aplicar en la ingeniería mecánica, puesto que actualmente la *Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos* (ASME), sobre la base de lo establecido por la AIAA y con el objetivo de desarrollar normas para evaluar la corrección y credibilidad de la modelación y simulación en mecánica de sólidos computacional, aprobó y puso en conocimiento de la comunidad ingenieril su primer documento fundacional dedicado a consensuar los conceptos de V&V para los propósitos de la mecánica de sólidos computacional. El presente trabajo explicita algunos problemas actuales relacionados con estos conceptos.

Palabras Claves: Códigos Computacionales, Verificación, Validación, Calibración.

1. INTRODUCCIÓN

La actividad de investigación en las ciencias de la ingeniería se destaca actualmente por desarrollarse en tres niveles: teórico, computacional y experimental, donde la modelación y simulación computacional son importantes como herramientas para el análisis y/o, diseño y/o control de procesos, sistemas físicos, sistemas de ingeniería, subsistemas, componentes, etc. Desde una perspectiva conceptual una cuestión crítica que surge en el ámbito computacional en física e ingeniería y planteada por Oberkampf *et al.* [1], es *¿Cómo debe ser evaluada críticamente la confianza en la modelación y simulación?* Considerando: que el desarrollo de modelos es una actividad central en ingeniería y ciencia, que la respuesta a esta cuestión o cuestiones similares es un tema actual de interés [2-7], y que en el ámbito de la educación se estima que se ha puesto poca atención al proceso de la creación del modelo y su validación [8], se evaluó como pertinente emprender la tarea de incluir en el ámbito de la enseñanza de posgrado en ingeniería la discusión crítica de esta problemática conceptual. Se realizó esta tarea sobre la base de fundamentos aportados por disciplinas involucradas con el análisis crítico sobre la producción y justificación del conocimiento y sobre la base de conceptos consensuados por el comité de Normas de la Dinámica de Fluidos Computacional de la *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA)* [9,10], actualmente adoptados con ligeras modificaciones por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) [3], con el objetivo de desarrollar normas para evaluar la corrección y credibilidad de la modelación y simulación en mecánica de sólidos computacional.

Para la inserción de esta temática en el ámbito educativo se consideró como adecuado analizar los diferentes problemas en contextos, en forma similar a como se realiza en ciencia. La propuesta que frecuentemente se realiza desde la epistemología es que los problemas del conocimiento científico pueden analizarse en tres contextos. Un contexto de *descubrimiento* que abarca lo relativo a la forma en que los científicos arriban a sus conjeturas, hipótesis o afirmaciones. Un *contexto de justificación*, que abarca cuestiones relativas a la validación del conocimiento, y un *contexto de aplicación*, integrado por cuestiones de la puesta en práctica del conocimiento adquirido. En forma similar y con fines de análisis se propuso la distinción de tres contextos en la práctica de la investigación mediante códigos computacionales [11]. Un *contexto de modelación*, que abarca las cuestiones vinculadas con el desarrollo e implementación de un código computacional, un *contexto de justificación* con cuestiones sobre la validación del conocimiento producido por el código; y un *contexto de aplicación* del código computacional. Al proponer esta similitud de contextos, se supone que un código en su estructura es formalmente similar a una teoría científica. Por consiguiente, la justificación del conocimiento producido por un código computacional se analiza con las mismas pautas utilizadas para justificar el conocimiento producido por una teoría científica. El análisis y contenido que se explicita en este trabajo, no exhaustivo e introductorio, básicamente

corresponde a la forma en que es expuesto el tema en una clase de un curso de posgrado cuyos contenidos están vinculados a la ingeniería como ciencia de lo artificial.

2. EL CONTEXTO DE MODELACIÓN

La etapa de modelación se entiende como un “proceso de construcción o modificación de un modelo.” y se asume que un modelo es “una representación de un sistema físico o proceso, que se propone para incrementar nuestra capacidad de comprender, predecir, o controlar su comportamiento.”ⁱ Para nuestros fines, resulta útil discernir entre modelo conceptual, modelo matemático y modelo computacional. Un diagrama de la secuencia de modelos se presenta en la guía elaborada por el comité V&V10 de la ASME [3]. Esta secuencia se interpreta aquí y en lo siguiente sobre la base de considerar a los modelos como hipótesis (Fig. 1). Se considera que un modelo es una representación hipotética obtenida empleando el método abstractivo, esto es, un modelo es una abstracción de un sistema, deliberadamente se centra sobre algunos aspectos del sistema excluyendo a otros. La abstracción consiste, en este sentido, en ignorar detalles que no son relevantes a una realidad de interés particular. Una de las ventajas de esto es que solamente pequeñas cantidades de información relacionadas necesitan ser obtenidas, procesadas, organizadas y analizadas, aplicando técnicas específicas pertinentes a los aspectos bajo investigación.

El primer modelo en la secuencia es el **modelo conceptual**: “el conjunto de suposiciones y descripciones (...) que representan el comportamiento de la realidad de interés (...) desde las cuales el modelo matemático y los experimentos de validación pueden ser construidos.”[3] Podemos interpretar que un modelo conceptual se construye sobre la base de un conjunto de abstracciones que definen una representación hipotética consistente con el conocimiento tecnológico y científico compartido. Básicamente podemos interpretar que un modelo conceptual constituye una hipótesis de cómo se comporta un sistema o proceso [12]. Esta hipótesis se puede expresar en forma cuantitativa con un **modelo matemático**, esto es, “un conjunto de ecuaciones matemáticas, valores de frontera, condiciones iniciales, y datos de modelación necesarios para describir el modelo conceptual.”[3]. Los modelos matemáticos son idealizaciones que representan los procesos o sistemas en forma de ecuaciones [12]. Los datos de un modelo matemático representan información factual que define los valores o rangos de valores de los parámetros en el modelo matemático de un proceso o sistema físico [5]. Los coeficientes de las ecuaciones son los parámetros, que son las medidas de las propiedades físicas, de los contornos y fronteras, y de las acciones en el sistema y las interfaces; las variables dependientes de las ecuaciones son las medidas del estado del sistema y se determinan matemáticamente mediante la resolución de las ecuaciones.

Cuando se implementa un **algoritmo numérico** en un código de ordenador para resolver, por ejemplo, una o más ecuaciones en derivadas parciales, el **código** que se obtiene puede interpretarse como un modelo genérico.

Cuando se especifican las dimensiones de la malla, las condiciones de contorno y otros parámetros en una de las aplicaciones de un modelo genérico para representar un problema de un área determinada, el programa que se obtiene es un modelo de un área específica y constituye el modelo final en la secuencia: el **modelo computacional**. De esta manera, en el “contexto de modelación” se proponen, como intento de respuesta o soluciones a problemas identificados, modelos conceptuales y modelos matemáticos, y cuando estos últimos son implementados en códigos permiten desarrollar modelos computacionales para predecir, mediante simulación, por ejemplo, el comportamiento de un sistema de ingeniería. El concepto de predicción es definido por la AIAA como: “uso de un modelo computacional para anticipar el estado de un sistema físico bajo condiciones para las cuales el modelo no ha sido validado.” [4,9]

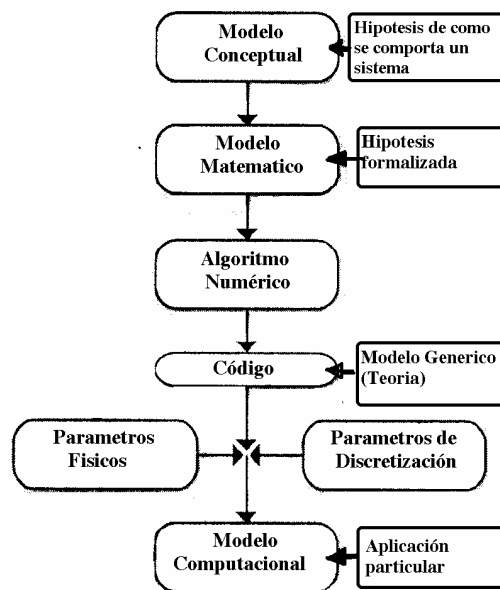


Figura 1: Interpretación del diagrama de secuencia de modelos (V&V10-ASME [3]), donde se considera a los modelos como hipótesis.

3. EL CONTEXTO DE JUSTIFICACIÓN

¿En qué fundamentamos nuestra “confianza” en los resultados del modelo computacional obtenidos a través del código? Es en el *contexto de justificación* donde se abordan cuestiones asociadas al qué y cómo evaluar para saber si el código es confiable o no, si replica adecuadamente la entidad física que se investiga, si los resultados experimentales acuerdan con los resultados de las simulaciones, si podemos tener “confianza” en las predicciones, si se ha incrementado en forma efectiva el conocimiento disponible. El contexto de justificación es normativo y los conceptos de verificación y validación (V&V) tratan de dar respuesta a la cuestión de *cómo debe ser evaluada críticamente la confianza en la modelación y simulación*. En la revisión de los conceptos de V&V, se encuentra una amplia variedad de significados presentes en varias disciplinas [1], lo cual se asocia a la complejidad involucrada con estos

conceptos, que incluyen cuestiones teóricas, computacionales, matemáticas, experimentales y diferentes perspectivas desde la filosofía de la ciencia [5, 6]. Estos conceptos se los introduce en el curso en una forma equivalente a través de dos cuestiones que generalmente se plantean en referencias bibliográficas mencionadas: 1) ¿Estamos resolviendo correctamente en forma discreta las ecuaciones que representan el proceso físico basadas en una matemática del continuo?; 2) ¿Estamos resolviendo las ecuaciones adecuadas?, es decir, ¿el modelo conceptual o las ecuaciones que hemos seleccionado son las que mejor representan el fenómeno o proceso físico que queremos investigar? De la primera trata la *verificación*, y de la segunda cuestión trata la *validación*. Sobre la base de los conceptos de la AIAAⁱⁱ, el comité V&V10 de la ASME adopta como Verificación: *el proceso de determinar que un modelo computacional exactamente representa el modelo matemático que lo fundamenta y su solución*, Validación: *el proceso de determinar el grado al cual un modelo es una representación exacta del mundo real desde la perspectiva de los usos pretendidos del modelo* [3]. Un examen de estas definiciones nos indica que son procesos involucrados con lograr representaciones exactas, donde validación pertenece al dominio de la física y verificación pertenece al dominio de las matemáticas, constando este último de dos etapas fundamentales: verificación de código y verificación de solución. El comité V&V10 considera que “gran parte de la V&V no es una ciencia ‘dura’, esencia de la mayor parte de la mecánica computacional, sino más bien una ciencia ‘blanda’ como la filosofía de la ciencia, donde diferentes puntos de vista tienen mérito, y no necesitan ser evaluados como correctos o equivocados” [3]; esto constituye un importante reconocimiento que permite fundamentar el carácter transdisciplinario de esta temática, y en este marco, la disciplina que se adoptó para realizar un análisis crítico es la epistemología, que básicamente tiene como objetivo el análisis de las condiciones de producción y validación del conocimiento científico y del conocimiento tecnológico. Los conceptos de V&V fueron caracterizados desde una perspectiva de la filosofía de la ciencia en el contexto de justificación en la actividad de investigación mediante códigos computacionales [11] y los diferentes niveles y contextos fueron representados esquemáticamente, de acuerdo a la siguiente figura que aquí se reproduce con algunas modificaciones.

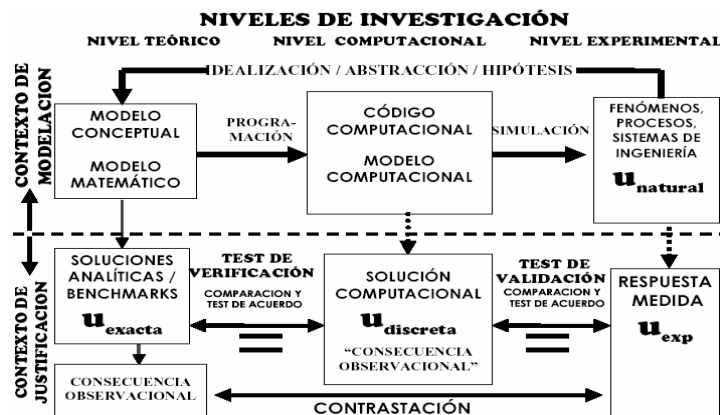


Figura 2 Diagrama conceptual de niveles y contextos (Basado en [11])

Si bien toda representación es incompleta y captura solamente algunos aspectos de los conceptos tratados, resulta una herramienta útil puesto que generalmente incentiva la reflexión crítica sobre diferentes aspectos. El esquema permite presentar y analizar: a) el lugar ocupado por V&V en el contexto de justificación, b) la interrelación entre los tres niveles de investigación que actualmente coexisten en la práctica de la investigación científica y tecnológica, c) una taxonomía de errores en V&V que se definen con las distintas salidas, U_{exacta} , $U_{discreta}$, U_{exp} , $U_{natural}$. Con la ayuda de esta taxonomía, complementado con las referencias [1,4] como material de estudio, se enfatiza que el proceso de verificación involucra dos etapas básicas. Por un lado *verificación de código*, donde se determina si el mismo implementa fielmente al modelo computacional, comprobándose por ejemplo que no existan errores de programación; y por otro lado, *verificación de solución*, donde se determina si la solución del modelo computacional discreto reproduce la solución analítica del modelo matemático ("continuo"). Para la verificación de solución se constituye como un ideal disponer de soluciones analíticas de las ecuaciones diferenciales (ordinarias o a derivadas parciales) que el código debe resolver, pero en muchos casos estas soluciones exactas no existen. Para estos casos resulta interesante el método de las soluciones manufacturadas o construidas [13], el cual se encuentra ejemplificado en la guía ASME donde se presenta una solución construida para una ecuación diferencial ordinaria (O.D.E.) que representa el modelo matemático a utilizar para investigar las deflexiones de un ala de avión, que se modela conceptualmente como una viga de sección variable, empotrada en un extremo y libre en el otro, con carga uniforme $w(x)$.

4. PROBLEMAS ACTUALES

La discusión crítica y reflexiva de estos conceptos principalmente se desarrolla durante la presentación de dos problemas actuales asociados a los mismos: el problema de la validación y el problema de la calibración, los cuales brevemente se presentan a continuación.

4.1 El problema de la validación

En el contexto de justificación, en ciencia, se pregunta: ¿cómo se conoce que una teoría describe adecuadamente la realidad?, y esto comprende toda cuestión relativa a la validación del conocimiento. Análogamente en la investigación mediante códigos computacionales preguntamos ¿cómo se conoce que un código describe adecuadamente la "realidad", por ejemplo el comportamiento, frente a una acción externa, del sistema de ingeniería que se está investigando? La suposición que un código es formalmente similar a una teoría científica, de acuerdo a Kleindorfer *et al.* [6] es el origen del problema de la validación: *"El problema de la validación en simulación es un reconocimiento explícito que los modelos de simulación son como teorías científicas en miniatura... Como tal, las garantías que podamos dar por estos modelos pueden ser discutidas en los mismos términos que utilizamos en la teorización"*

científica en general.” Stevenson [7], expresa que: *el problema de la validación es exteriorizar las condiciones bajo las cuales acordamos (1) que las observaciones y cálculos están en suficiente acuerdo y (2) que lo teórico producirá este acuerdo en futuros cálculos.*

Estas cuestiones están relacionadas con un problema fundamental de la epistemología o, al menos, del contexto de justificación, que es el saber si las proposiciones, afirmaciones o enunciados que se proponen hipotéticamente como respuesta a un problema dado son verdaderos o no. En este sentido, uno de los procedimientos utilizados en ciencia para decidir acerca del valor de verdad de una proposición hipotética es el de contrastación de hipótesis [14-16].

El procedimiento de contrastar es deductivo. De acuerdo a Popper [14], con ayuda de otros enunciados anteriormente aceptados se deducen de la teoría a contrastar ciertos enunciados singulares -que podremos denominar “predicciones”, en especial predicciones que sean fácilmente contrastables o aplicables. A continuación tratamos de decidir en lo que se refiere a estos enunciados deducidos comparándolos con los resultados de las aplicaciones prácticas y de experimentos. Si la decisión es positiva, esto es, si las conclusiones singulares resultan ser aceptables, o verificadas, la teoría a que nos referimos ha pasado con éxito las contrastaciones (por esta vez). Pero si la decisión es negativa, o sea, si las conclusiones han sido falsadas, esto revela que la teoría de la que se han deducido lógicamente es también falsa.

Considerando la similitud establecida entre código y teoría científica, se puede afirmar que la instancia de un test de validación, que de acuerdo a la AIAA se debe ejecutar en el proceso de evaluación de un modelo computacional, es coherente con el procedimiento de contrastación de hipótesis en ciencia.

La existencia de un fundamento lógico asociado a los tipos de razonamientos involucrados en esta etapa de contrastación, permite llegar a la conclusión que no es posible afirmar la verdad de una hipótesis en el caso que exista concordancia entre lo predicho y lo observado en las experiencias correspondientes. Consecuentemente se concluye que un modelo no puede ser validado ni verificado completamente, solamente puede ser probado a ser falso (o que contiene errores). De esta manera, el problema de la validación no tiene solución en cuanto a que no podemos afirmar que lo deducido a través del modelo en futuros cálculos seguirá produciendo el acuerdo con lo experimental, básicamente cuando los resultados de esos cálculos tienen el carácter de una predicción, problema que ya está explícito en el concepto de predicción de la AIAA. En el otro caso, esto es si no existiese esta concordancia, de acuerdo al resultado lógico que fundamenta la postura falsacionista de Popper, estamos en una situación en que conocemos cómo no es lo que estamos investigando, y en este sentido podemos aprender de los errores, esto es, la falla de un modelo no es necesariamente negativa puesto que nos alerta de la existencia de errores y por lo tanto cuando se corrige el modelo puede resultar en una comprensión mejorada de lo que estamos investigando, *“cuando un modelo no es correcto, a menudo aprendemos mucho más que cuando lo es. Si un modelo realiza una predicción equivocada, usualmente significa que no hemos comprendido alguna característica*

fundamental de la naturaleza. A menudo aprendemos por los errores." [17]. Pero la corrección de un modelo, puede traer otro problema asociado.

4.2. El problema de la calibración

Asociado en una forma compleja a los conceptos de V&V se encuentra el concepto de calibración. En la guía, producida por el comité V&V10 de la ASME, se reconoce un problema conceptual asociado a este concepto de la manera que a continuación se transcribe: *"...En este punto el modelo computacional puede ser ejecutado (corrido) y los resultados comparados a los datos experimentales disponibles para validación del modelo. Es frecuente el caso de que los resultados no se comparan como favorables (...). Asumiendo un alto grado de confianza en los datos experimentales el analista tiene dos elecciones básicas para revisar el modelo: cambiar la forma del modelo o calibrar los parámetros del modelo. Quizás la peor comprendida, y de esta manera la más abusada forma de revisión de un modelo es la Calibración del modelo –"el proceso de ajustar parámetros de modelación física en el modelo computacional para mejorar el acuerdo con datos experimentales."* [3]

De acuerdo a una revisión de diferentes conceptualizaciones del término surge que *desde lo procedimental* la calibración de códigos computacionales es un proceso que se concreta actuando sobre parámetros de modelación física o numérica del código computacional, para mejorar o lograr la concordancia entre datos de salida del código con un conjunto de datos experimentales del sistema investigado o con datos que representan soluciones analíticas o datos apropiados provenientes de benchmarks [18].

Si se compara el proceso de validación y el proceso de verificación con el proceso de calibración, se concluye que en cuanto al objetivo final de lograr una representación exacta son muy similares. Consecuentemente resulta problemática su distinción si se los considera desde la perspectiva del contexto de justificación. Pero si se considera un modelo como hipótesis y analizamos la calibración desde el contexto de modelación, sobre la base del cumplimiento de restricciones empíricas y formales que limitan la construcción de un modelo se puede interpretar que *la calibración de códigos computacionales puede ser considerada como una estrategia del contexto de modelación para estimar si un parámetro o una ley que exprese su relación con otros parámetros, se encuentran dentro del conjunto de entradas admisibles, para decidir en consecuencia si tal parámetro o ley, forma parte de uno de los posibles modelos que explican el conjunto de datos de referencia disponibles del sistema (natural, social, artificial o formal)*. Como tal se propuso que forma parte de la metodología científica considerada como un sistema de procesos, reglas y estrategias por las cuales se puede obtener conocimiento [18].

5. CONSIDERACIONES FINALES

Un marco posible para la inserción de los conceptos de V&V y calibración en la enseñanza de la ingeniería fue presentado. De acuerdo a lo expuesto, incluir la discusión reflexiva de estos

conceptos requiere fundamentos provenientes de disciplinas relacionadas al análisis crítico sobre la producción de conocimientos científicos y tecnológicos. En principio resulta adecuado incluir estos contenidos en cursos de posgrado de ingeniería cuya temática se fundamente en este tipo de disciplinas. En este sentido, los conceptos tratados forman parte de los contenidos del curso *Introducción a la Ciencia e Ingeniería* que se dicta a Nivel de Maestría, donde el análisis de problemas actuales referidos a la producción de conocimiento forman parte de los contenidos mínimos. Los conceptos de V&V y de calibración que se han tomado como base, pueden ser transferidos a la enseñanza universitaria de grado a través de una serie de estudio de casos como método de enseñanza [19]. No obstante, las cuestiones asociadas a los conceptos muestran la necesidad de una relación interdisciplinaria entre ingeniería y disciplinas relacionadas con la metodología y epistemología de la tecnología y de la ciencia. La reflexión de segundo orden (filosófica) acerca de la práctica de investigación mediante códigos computacionales, actualmente aceptada por la comunidad normativa perteneciente a la ASME, necesita ser transmitida en cierta magnitud a la enseñanza de grado de las ingenierías, puesto que en el estado actual de la tecnología de cálculo y diseño, estas cuestiones surgen en el ejercicio actual de la práctica de la ingeniería y en la toma de decisiones a nivel gerencial. En el presente trabajo, si bien estuvo centrado en exponer la forma en que estos conceptos son insertados en la enseñanza de la ingeniería, se ha tratado de realizar un pequeño aporte desde la perspectiva de considerar a los modelos como hipótesis interpretando la secuencia de modelos propuesto por el comité V&V10 de la ASME. Finalmente se destaca que, si bien otros ítems resultan de importancia, los problemas de la validación en simulación y de la calibración de códigos computacionales, aún requieren actualmente de un análisis crítico con aportes de la comunidad involucrada.

6. REFERENCIAS

- [1] W.L. Oberkampf, T.G. Trucano, CH.Hirsch, Verification, Validation, and Capability in Computational Engineering and Physics www.ussacm.org/vnvcsn/ (2002)
- [2] W.L. Oberkampf and T.G. Trucano, Verification and Validation Benchmarks, Sandia National, SAND2007-0853 Laboratories, (2007).
- [3] L.E. Schwer, An Overview of the ASME PTC/60/V&V10, Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics, *iacm expressions* **20** pp.14-21., (2007).
- [4] W.L Oberkampf. and T.G.Trucano, Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics, *Progress in Aerospace Sciences* , **38**(3): pp. 209-272., (2002).
- [5] Babuska, J. Tinsley Oden, Verification and validation in computational engineering and science: basic concepts. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* **193**, pp. 4057-4066 (2004)
- [6] G.B Kleindorfer., *et al.* Validation in simulation: various positions in the philosophy of science. *Management Science*, **44**. (1998)

- [7] D.E. Stevenson, A Critical Look at Design, Verification, and Validation of Large Scale Simulations. Clemson University, Clemson, SC 29634-1906.
- [8] J. Desel, Teaching system modeling, simulation and validation. Proceedings Winter Simulation Conference J.AA. Joines, R.R. Barton, Kang, and P.A. Fishwick, eds. (2000)
- [9] R.R. Cosner, C.P. Rahaim, The AIAA Committee on Standards for CFD. (2001)
- [10] J.W. Slater Overview of CFD V&V. www.grc.nasa.gov, (2002)
- [11] R.A. Dean, Una Perspectiva Sobre Contextos en la Investigación Mediante Códigos Computacionales. En: *Epistemología e Historia de la Ciencia*, Edit. P.García y P. Morey. (2004), **10**, pp.168-175, (2004).
- [12] L.E. Konikov, *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico*, IGME. Temas: guías y manuales. ISBN84-7840-465-1
- [13] S.V. Meleshko, *Methods for Constructing Exact Solutions of Partial Differential Equations: Mathematical and Analytical Techniques with Applications to Engineering*. SpringerUS. (2005).
- [14] K.R. Popper, *La Lógica de la Investigación Científica*. Edit REI. Pp.32-33, (1989)
- [15] H. Miguel, E. Baringoltz, *Problemas epistemológicos y metodológicos*. Eudeba. (1998)
- [16] E. Flichman, H. Miguel, J. Paruelo, G. Pissinis. *Las raíces y los frutos*, Bs As, Eudeba, pp. 65-82, 159-165 (1998)
- [17] R.K. Coll, In: *Metaphor and Analogy in Science Education*. Edited by Aubusson P.J., et al. , Science & Technology Education Library, **30**, Springer Netherlands, pp 65-77, (2006)
- [18] R.A. Dean, L.S. Maglione. El Concepto de Calibración en Códigos Computacionales: Una perspectiva desde la concepción hipotética de la ciencia. *Trabajo presentado en XVIII Jornadas de Epistemología e Historia de la Ciencia, Córdoba, Oct. (2007)*.
- [19] S. Wassermann, *El estudio de casos como método de enseñanza*. Amorrortu edit. Bs.As. (1999)

Notas

ⁱ AIAA G-077-1998, cit. en [9]

ⁱⁱ La comunidad de la *American Institute of Aeronautics and Astronautics* (AIAA), en particular la Comisión de Normas para la Dinámica Computacional de Fluidos, propuso conceptos de V&V adecuados al ámbito computacional en física e ingeniería., y se encuentran definidos en AIAAG-077-1998.