

GEOFISICA COMPUTACIONAL Y ENSEÑANZA EN EL POSGRADO

J. Frez

División Ciencias de la Tierra, CICESE, Ensenada, B. C.

RESUMEN

Las Ciencias de la Computación tienen un vertiginoso progreso al cual la enseñanza superior debe adaptarse. El progreso se refiere tanto al acceso a computadoras y a la capacidad de ellas, en memoria y velocidad de cómputo, como al acceso a paquetes de programación que realizan complicadas tareas en la captación, control, análisis e interpretación de datos así como en la formación de modelos y en visualización. El uso de estas herramientas como "cajas negras" representan un problema pedagógico de importancia. Por otro lado, el lenguaje C, predominante en las Escuelas de Ciencias Computacionales, se está introduciendo fuertemente en el cálculo científico; su ventaja con respecto al FORTRAN yace en su cercanía a los sistemas operativos, haciéndolo especialmente apto para leer y escribir grandes cantidades de datos y formar programas interactivos que combinan cómputo numérico con visualización. El FORTRAN cuenta con la enorme cantidad de trabajo ya realizado y su adaptabilidad a las nuevas técnicas de programación. Es importante que los estudiantes desarrollen y mantengan programas fuentes en un lenguaje de alto nivel con el consecuente mayor control del trabajo científico. La enseñanza de la Geofísica en el posgrado debe delimitar el alcance de los paquetes de programas de uso común, destacando la especificidad tanto del cálculo con números reales en representación flotante como de la discretización de ecuaciones en variables continuas; así mismo, debe destacar la indeterminación de la mayor parte de los problemas inversos de la Geofísica. También es importante estimular el desarrollo de procedimientos que hagan interactivo el cálculo numérico con la visualización de resultados.

INTRODUCCIÓN

Los cálculos hechos por computadoras se han vuelto imprescindibles en la investigación científica y, por ende, en la enseñanza de posgrado. A partir de las primeras máquinas, los físicos (ver por ejemplo Bolt, 1970) tomaron entusiastamente este nuevo instrumento creando las diversas áreas de la Física Computacional, un nuevo campo de investigación que resuelve problemas que no estaban al alcance de los métodos tradicionales de la matemática analítica (más apropiadamente llamada matemática de precisión infinita para distinguirla del cálculo con precisión finita hecho en computadoras), ni al limitado alcance de los cálculos numéricos hechos "a mano" o con calculadoras mecánicas. En Geofísica, su uso en la recolección de datos y de control de equipo, el tratamiento e interpretación de datos, la simulación (modelado) determinística o probabilística y el álgebra simbólica han llevado a un progreso veloz y enorme, en amplitud y profundidad, del conocimiento que se genera y aplica en la academia y en la industria y se transmite en la educación superior. No sin problemas, sin duda. Brody (1989) detectó a mediados de los años 80 algunos de ellos. Los resultados de monstruosos programas resisten una propiedad del método científico: la reproducción y comprobación de resultados; esto hace también difícil la revisión de artículos en este campo. Detectar un error en un programa de miles de sentencias es tarea casi imposible; hacerlo a través de comprobaciones numéricas es también difícil. Un programa típico, que incluye aproximaciones de diversos tipos, puede entregar resultados equivocados especialmente a un usuario poco ilustrado y/o entrenado. De aquí que muchos investigadores se resistan al uso indiscriminado de programas

grandes sin una comprensión clara de sus limitaciones.

El tema a tratar tiene un contexto más general que el sugerido en el título, ya que también tiene que ver con el uso de calculadoras en la enseñanza primaria y secundaria, de computadoras en la enseñanza secundaria y universitaria así como de paquetes "cerrados" o "envasados" con procedimientos numérico-computacionales en toda la enseñanza superior. Llamamos procedimientos "cerrados" a aquellos que se utilizan sin que el usuario tenga acceso al código del procedimiento y que, por lo tanto, no puede modificar. La tendencia a usar estas "cajas negras" numéricas es útil porque ahorra esfuerzos; peligrosa, porque no podemos analizar directamente sus limitaciones (todo procedimiento numérico tiene limitaciones). Su utilización se ha ampliado enormemente durante los años 80 y 90. Así, nuestro tema trata del necesario balance entre el cálculo hecho mecánicamente y el realizado por la mente humana que incluye el análisis que valida un procedimiento computacional. Otro balance importante es entre utilización y generación de métodos numérico-computacionales y de visualización en la ciencia y la enseñanza.

Es necesario enfatizar lo vertiginoso del progreso en las Ciencias Computacionales durante su corta existencia; como resultado, están cambiando no sólo las estrategias y técnicas de investigación, sino toda la civilización contemporánea. Nuestra adaptación a este progreso es parte de una educación actualizada.

Las tres secciones siguientes se desglosan en temas que se separan y rotulan con una letra; esto solo con el objeto de una fácil identificación para su discusión. La misma letra no designa el mismo tema en secciones diferentes.

CAMBIOS OCURRIDOS EN LOS ULTIMOS 20 AÑOS

Tratemos de enumerar los desarrollos en las Ciencias Computacionales que están produciendo modificaciones en la enseñanza de técnicas numérico-computacionales en el posgrado en Geofísica.

- a. El acceso extendido a computadoras por un estudiante típico: no es difícil que maneje una PC en su casa y en el sitio de estudio puede tener acceso a varias computadoras personales, estaciones de trabajo y hasta, computadoras con varios procesadores. Muchos investigadores tienen, además, acceso a máquinas en otros institutos de donde extraen datos, programas de computación o simplemente trabajan con mayores o diferentes recursos computacionales; en consecuencia, los estudiantes también se benefician de esta ventaja. Por último, aún un estudiante no educado en técnicas de computación saca ventajas de ellas a través de paquetes que le producen dibujos o del editor con el cual se elabora el texto de su tesis.
- b. Este acceso extendido a computadoras se amplifica por la suma de recursos a disposición en cada sistema, en tiempo de uso y de cómputo, en memorias blanda (de trabajo) y dura (de almacenamiento), en número de procesadores, en capacidad de graficado, en velocidad para obtener resultados. Durante los últimos diez años la velocidad de cálculo se está casi doblando cada dos años en las computadoras personales. El estudiante de posgrado, al tener una participación fuerte en la investigación, goza de los privilegios correspondientes. Por ejemplo, la construcción de modelos sismológicos globales de la Tierra utiliza actualmente cientos de miles de datos (tiempos de arribos de ondas sísmicas, periodos libres de la Tierra, etc.). Esta tendencia continuará mantenida por el ingenio y el mercado con precios que continúan decreciendo: es ya posible construir una supercomputadora por algo menos de \$ 60,000.00 US apilando 16 procesadores Pentium Pro (Taubes, 1996).
- c. La confianza en los resultados del cálculo hecho por computadoras ha aumentado también. Si durante la década de los 60 todavía se detectaban errores en la manera como se calculaban las funciones matemáticas, es posible contar en nuestros días, por ejemplo, en que los cálculos básicos del Algebra Lineal (operaciones con matrices incluyendo la multiplicación e inversión, la solución de sistemas lineales bien condicionados, además de las descomposiciones espectrales y sus aplicaciones) están bien implementados en los diversos paquetes comerciales y no comerciales, casi siempre basados en el trabajo de Wilkinson y colaboradores (Wilkinson y Reinch, 1971). Por supuesto que otra cosa es aplicar adecuadamente las funciones, procedimientos o rutinas que llegan a nuestras manos, muchas veces sin los programas fuentes. No en vano la mayor parte de las compañías rehusan tomar
- d. El uso de varios idiomas en cálculo científico: para nombrar los que han tenido o tienen influencia, PL-1, APL, BASIC, FORTRAN, PASCAL y C/C++, con un predominio creciente en el ambiente académico del C. Por otro lado, la mayor parte de los investigadores geofísicos que se formaron en las décadas de los 70 y 80 utilizan FORTRAN. En estos momentos, la utilización y el futuro del FORTRAN en comparación del C/C++ está siendo cuestionada abiertamente en cuanto a su uso en el cálculo científico (Buzzi-Ferrari, 1993) y en la enseñanza universitaria (Pifer, 1996).
- e. Lo anterior representa el continuo desarrollo en técnicas de programación, en particular el uso de programación estructurada, modularizada, con uso dinámico de memoria, punteros, estructuras y de objetos cada vez más concretos. Esto lleva a formar códigos más claros, fáciles de leer y, para la programación comercial, módulos que pueden ser agregados o reemplazados como las tarjetas de los instrumentos electrónicos.
- f. Las Escuelas de Ciencias Computacionales se dirigen casi exclusivamente al manejo de sistemas, con una sensible falta de entrenamiento de los estudiantes en cálculo científico, en particular en el manejo de números reales en representación flotante. Como consecuencia del origen del C como asociado al sistema operativo UNIX, este idioma domina en la enseñanza especializada; por otro lado, los sistemas operativos UNIX, de las "Macs", el WINDOWS de Microsoft, así como los sistemas de ventanas de las estaciones de trabajo están escritos en C/C++. Como resultado, el diseño e implementación de sistemas interactivos que aplican métodos numéricos a algún problema científico y que incluyen visualización están comúnmente escritos en C/C++.
- g. Ya que la enseñanza de técnicas numérico-computacionales en Física e Ingeniería es generalmente entregada en la Universidad por profesores que provienen de la tendencia que predomina en las Ciencias Computacionales, el uso de C/C++ también domina en estas áreas, manteniéndose el FORTRAN como un "segundo lenguaje" cuyo uso se pierde por eliminación.
- h. El cálculo científico forma un "nicho económico" para la industria que vende computadoras y programación, pero las grandes ventas (Lewis, 1996) favorecen los paquetes "cerrados" que manejan grandes bases de datos con visualización como Power Building y Visual Basic y que son utilizados preferentemente por instituciones financieras. En programación financiera, COBOL sigue siendo el compilador más vendido lo que puede ser una sorpresa para

miembros de la comunidad científica. Más importante para nuestro tema es que la visualización, en cuanto a herramienta de análisis y de presentación de resultados, es tan necesario en finanzas como en el campo de las ciencias y su uso es obligado en la computación de gran escala, ya sea por manejo de grandes bases de datos o en el modelado que incluye gran heterogeneidad.

- i. Las características mencionadas hasta aquí están cambiando el formato de los textos de Análisis, Cálculo o Técnicas Numéricas. Un texto moderno (tome, por ejemplo, Burden y Faires, 1996) incluyen algoritmos descritos en pseudo-lenguaje para cada procedimiento numérico elemental de importancia y un estudiante mediano puede trasladarlo rápidamente en código computacional en su idioma favorito o requerido. Esto implica que el "análisis" está siendo parcialmente reemplazado por la "aplicación" directa en la computadora. De este modo, el estudiante universitario queda en condiciones de implementar una gran cantidad de algoritmos, muchas veces sin la comprensión del valor relativo de metodologías opcionales.
- j. Un desarrollo mayor de esta tendencia es el texto tipo "Recetas Numérico-Computacionales", donde las rutinas o funciones están entregadas directamente como programas fuentes al estudiante/investigador. Una visita a librerías de universidades en Estados Unidos constata un aumento en el número de textos con recetas computacionales escritas en C con respecto a FORTRAN y PASCAL. Además, es posible obtener librerías completas de cómputo científico a través de la comunicación electrónica, incluyendo las publicadas en textos y en revistas especializadas.
- k. A un nivel más alto de esta tendencia, se está popularizando el uso de paquetes "cerrados" de procedimientos numérico-computacionales y de visualización para el cálculo científico, donde un simple llamado a un procedimiento realiza una serie compleja de métodos numéricos, pudiendo reemplazar gran parte de la actividad de programación que hacía un estudiante de posgrado de los años 70 y 80. Parte de la educación universitaria en Física se hace con la ayuda de MATHEMATICA o MATLAB. Los ejercicios numéricos de algunos textos avanzados se hacen utilizando paquetes comerciales como MATLAB (por ejemplo, en Gil *et al.*, 1991). Existen, además, otros paquetes que ayudan a hacer cálculos estadísticos, derivar e integrar funciones simbólicamente, derivar e integrar numéricamente, hacer gráficas en una, dos o tres dimensiones, etc. En Geofísica y Geología, la situación es parecida, con la mayor parte de los programas fuentes escritos en FORTRAN. Existen ya unos diez o más paquetes de programación que trazan rayos sísmicos en medios bidimensionales y que son relativamente confiables. Hay un número parecido de procedimientos para calcular sismogramas en medios lateralmente homogéneos, para estimar hipocentros, mecanismos focales, calcular resistividades aparentes a partir de distintos tipos de mediciones, así como para modelar anomalías gravimétricas o magnéticas.

Comúnmente, el cálculo directo va acompañado del inverso. El análisis de series de tiempo se ha mecanizado: con simples toques al ratón, se pueden aplicar filtros, ventanas y hacer inspección visual. Mientras más comercial sea el paquete, más avanzada es la capacidad de visualización interactiva. Por otro lado, se va extendiendo la capacidad de programadores comunes para hacer esta interacción gráfica, por copia de programas fuente que se distribuyen y que realizan tareas parecidas. La secuencia interactiva de cálculos y visualización ya es la principal herramienta para analizar e interpretar datos, así como para resolver problemas directos e inversos en el caso de estructuras y fuentes geofísicas complejas y, por lo tanto, utilizando grandes bases de datos.

- l. Un problema más complicado es la necesidad de estandarizar entradas típicas a programas semejantes o complementarios. La SEG (Society of Exploration Geophysicists), por ejemplo, ha desarrollado formatos de entradas estandarizadas (SEG-2, SEG-Y) para datos geofísicos que son de uso amplio; al lado de ellos, están los derivados (SEGYPASSCAL, por ejemplo) y alternativos (SAC, GSE, AH, CSS y otros) tanto para el intercambio como para el análisis de datos (Malone, 1997). Como resultado natural de la diversidad existente, aparecen traductores de formatos. A un nivel más alto, tenemos la labor de comparar paquetes de programas que hacen tareas iguales o muy semejantes con el fin de detectar errores. En Inglaterra, por ejemplo, se ha formado la Geological Society Working Group on Geological Software que está produciendo catálogos de paquetes computacionales para geólogos (Reynolds, 1991). Un complemento a esta idea es la de promover el uso de datos o entradas estandarizadas para los procedimientos computacionales más comunes en Geofísica.
- m. Por último, podemos destacar la posibilidad de utilización de las redes intercomputadoras para acceder a procedimientos computacionales y de graficado, en particular escritos en lenguajes "transparentes" como JAVA. En particular, es posible obtener una gran cantidad de programas de cómputo científico a través de la comunicación electrónica, incluyendo aquellos que resuelven problemas geofísicos; la mayoría de ellos están disponibles como programas fuente. Secciones de revistas como "Another Node on the Internet" en Computers and Geosciences y "Electronic Seismologist" en el Bulletin of the Seismological Society of America están constantemente entregando información al respecto.

CONSECUENCIAS Y PROBLEMAS PLANTEADOS

Para adaptar la enseñanza en el posgrado a la situación descrita, debemos considerar varios factores. Uno de ellos es la tradición, gusto y evolución del profesor incluyendo la investigación que realiza. Otros factores son el conocimiento

básico que trae el estudiante, las fuentes de trabajo para los cuales se está formando y las perspectivas generales en el campo científico, técnico y socio-económico que se proyectan en el futuro. También depende de diversas formas que toma la ley del menor esfuerzo en la práctica de la enseñanza y el aprendizaje. Además, están implícitas ciertas suposiciones adicionales, algunas que resultan de la realidad y otras que provienen de principios éticos que no están muy abiertas a la discusión. Una de ellas es que enseñamos para los estudiantes que existen y no a los ideales que quisiéramos; otra es que enseñamos para el futuro; otra es que formamos y no damos pura información pragmática. En este sentido, debemos enseñar para fomentar el desarrollo y no simplemente para repetir la experiencia anterior. También podemos defender la idea de dejar las tareas más triviales a procedimientos mecanizados, suponiendo que el estudiante debe recordar y entender su origen conceptual.

En lo que sigue, discutiremos algunos aspectos que parecen interesantes y que resultan de la exposición anterior.

- a. Lo dicho anteriormente implica una definición más cuidadosa del concepto de "tareas triviales". Lo que es trivial para un estudiante que proviene de una carrera de Física no lo es para uno que proviene de Geología, dependiendo, además, de la universidad de origen y de los recursos computacionales que utilizó. Por otro lado, puede suceder que una técnica complicada de trabajo deba aplicarse a datos tomados y analizados por un estudiante cuyo conocimiento básico en técnicas numérico-computacionales es bajo. La consecuencia es que existen estudiantes que utilizan paquetes de programas cuyo estricto significado numérico no conocen. Es difícil analizar los beneficios y peligros de esta situación en general y depende del asesor, su conocimiento y atrevimiento, así como el incentivar y controlar adecuadamente este tipo de acción.
- b. Sin embargo, la utilización de paquetes "cerrados" constituye un problema más general: corresponde a todo el conocimiento de tipo "caja negra", es decir, aprendido y aplicado mecánicamente. La gran diferencia es que una mala aplicación de una "caja negra" en matemáticas se puede detectar probablemente con mayor facilidad que un mal uso de un paquete de programas de computación, ya que un procedimiento computacional incluye un gran número de elementos ya de por sí complejos dentro de los cuales están las aproximaciones de los métodos numérico-computacionales que se aplican. El remedio más obvio es estudiar con detalle los manuales correspondientes y, por lo menos, entender conceptualmente la metodología utilizada. Ésto se complementa con el análisis detallado de salidas, incluyendo los casos de prueba del paquete.
- c. Es evidente que las tres principales fortalezas del lenguaje C son las siguientes: En primer lugar, tiene una relación directa con el sistema operativo UNIX del cual puede utilizar funciones, particularmente para leer y escribir grandes cantidades de datos escritos en lenguaje de máquina. Una segunda ventaja lo constituye el haber sido el lenguaje que introdujo algunos de los aspectos de la programación moderna. Esta ventaja se acentúa en su extensión al C++. La tercera ventaja del C la constituye su predominio entre los programadores jóvenes, recién egresados de la Universidad. Las ventajas del C son que no fue diseñado originalmente para el cálculo científico y que la mayor parte de los cálculos en Geofísica Computacional aún están codificados en FORTRAN. Evidentemente, esta situación puede ser poco permanente ya que están apareciendo más textos de "recetas computacionales para científicos" en C que en FORTRAN. (Entre paréntesis, la mayor parte de los textos normales de C/C++ no están dirigidos para el investigador científico). Las ventajas del FORTRAN ya han sido destacadas. Fue diseñado para el cálculo científico, por lo que existe toda una generación de programadores que codifican y siguen codificando en FORTRAN. A eso se agrega su adaptabilidad a los progresos en técnicas de programación: las versiones de FORTRAN90 y algunas versiones del 77 incluyen las técnicas que se introdujeron con PASCAL y C. Por supuesto, que un viejo usuario de FORTRAN encontrará que el FORTRAN90 es casi un nuevo lenguaje. Como conclusión, se puede afirmar que el FORTRAN ha dejado atrás al ALGOL, PL-1, BASIC y PASCAL y que seguramente coexistirá con el C/C++ por un largo tiempo. La comparación entre ambos lenguajes puede tomar un cariz técnico, particularmente si se estudia la eficiencia y claridad de códigos escritos específicamente optimizados en ambos lenguajes. Dentro de las críticas lanzadas contra el FORTRAN está que fomenta la programación de tipo "espagueti", es decir, con excesivo uso de sentencias "go to" que son difíciles de seguir en el diagrama de flujo correspondiente. La respuesta es que el cálculo científico está tan lleno de opciones que los "camino" opcionales múltiples en un programa son una obligación. Sin embargo, un usuario de FORTRAN debe reconocer que es posible reducir la complejidad (a menudo artificial y producido por la consecutiva extensión de los propósitos del programa) de muchos códigos escritos en este lenguaje (Hopkins, 1996). En realidad, la producción de un código claro y eficiente depende más del programador que del lenguaje.
- d. ¿Cómo y dónde se forman los que desarrollarán la Geofísica Computacional futura? La respuesta a esta pregunta es importante ya que implica el estímulo para programar en las especialidades que lo necesiten. La tradición mundial es respetable. Por ejemplo, la tomografía computacional médica nació entre médicos y no desde programadores profesionales. Una codificación original puede ser profesionalizada posteriormente, pero el desarrollo inicial de muchas técnicas numérico-computacionales parte de los especialistas que lo necesitan y éste es un procedimiento que es necesario estimular. Así que el balance entre no duplicar esfuerzos y formar el especialista en la componente computacional debe ser parte de la política de desarrollo de cualquier Instituto de Investigación.

- e. Algunos conceptos básicos del cálculo científico (es decir, con números reales) utilizando computadoras (es decir, en representación flotante) deben ser parte de la cultura del estudiante. En particular, un conjunto de ejercicios numéricos, hechos con calculadoras y computadoras, pueden mostrar el fenómeno de pérdida de precisión en problemas mal condicionados. También es importante experimentar con la discretización de ecuaciones ya que la mayor parte del modelado matemático en Geofísica se representa con variables continuas. Un efecto típico es la ploriferación de valores característicos no singulares cuasi-nulos en una descomposición espectral. Otro aspecto importante en la cultura del trabajo numérico-computacional es el gran número de opciones que se tiene al formar un procedimiento numérico-computacional en sus pasos característicos: la formulación matemática, la selección del algoritmo numérico, el diseño y escritura del código, para terminar con la validación, optimización y documentación del programa (ver, por ejemplo, capítulos 12, 13 y 14 de Rice, 1983).
- f. Quizás el problema computacional más delicado y que merece trabajarse con programas fuentes bien comprendidos es el de inversión, en particular para estimar estructuras geofísicas. Este problema es, por naturaleza, indeterminado ya que utilizamos observaciones tomadas en la superficie de la Tierra para calcular propiedades distribuidas tridimensionalmente. Es decir, queremos "elevarnos" desde un mundo bidimensional a uno tridimensional, lo que en principio no es posible; como resultado numérico, debemos resolver sistemas de ecuaciones cuasi-indeterminadas lo que, a su vez, produce cálculos con fuerte pérdida de precisión. La selección de métodos de estabilización es una labor delicada que debe adecuarse a la especificidad de la situación de estudio. Mi política es pedir al estudiante que desarrolle su propia programación a partir de rutinas bien comprobadas que realicen las operaciones básicas del Álgebra Lineal, incluyendo la descomposición espectral, para el caso muy indeterminado (Smith *et al.*, 1976). Pasado un periodo de entrenamiento, el estudiante posee un control de cada procedimiento básico de inversión y puede probar fácilmente ideas nuevas.
- g. Un problema más difícil de discutir es el grado de eficiencia del código que se solicita al estudiante en su programación. Además de las reglas más triviales, podemos tomar el siguiente ejemplo. A finales de los años 60 y durante la década de los 70, se popularizó, por el paquete SSP de IBM (1970), el uso de un solo índice para representar matrices bidimensionales, de acuerdo con su almacenamiento "real" en computadoras escalares. Al mismo tiempo, se incentivó el almacenamiento de sólo los elementos del triángulo superior de matrices simétricas (de apareamiento frecuente en métodos mínimo cuadráticos) con considerable ahorro de espacio de memoria para matrices grandes. Esta táctica de optimización fue también popularizada por Gilbert (1971) en Geofísica para resolver problemas inversos y su

uso es todavía útil en problemas de mediana y gran escala en computadoras escalares. Actualmente la gran cantidad de recursos computacionales hace aparecer poco útil la necesidad de optimizar un código para problemas estándar que maneja un estudiante de Geofísica. El lenguaje C/C++ complica la situación, ya que el uso de "apuntadores a apuntadores" para matrices bidimensionales incentiva el uso de dos índices para representar las matrices en computadoras. Sin embargo, existe también la tendencia en C/C++ a utilizar la más eficiente representación unidimensional de índices de las matrices (Williams, 1995) para realizar sus operaciones básicas en computadoras escalares. El problema pedagógico se hace más difícil si hay conflictos entre optimización y claridad del código pero parece todavía útil incentivar la optimización de códigos en clases aunque la justificación sea menor que hace 10 o 20 años. Por otro lado, la optimización para computadoras con varios procesadores es una área de investigación en pleno desarrollo.

- h. Los métodos del cómputo científico están sujetos a un gran cambio y exige al profesor/investigador una fuerte dedicación. Un asesoramiento respecto al uso de "recetas" tomadas de textos y revistas exige erudición, un conocimiento profundo de métodos numéricos además de disciplina para aceptar procedimientos sólo después de comprobaciones significativas. En este trabajo, es cada vez más imprescindible el conocimiento de los dos lenguajes más utilizados, FORTRAN y C/C++. Mientras los progresos en otras áreas de la Geofísica se pueden monitorear en forma relativamente fácil siguiendo unas pocas revistas, la Geofísica Computacional exige del profesor una actitud atenta a la literatura en Ciencias Computacionales y Métodos Numéricos Computacionales, además de lo que se publica en revistas de Geofísica.

CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

- a. Debemos esperar que los nuevos estudiantes usen C en vez de FORTRAN, particularmente los que provienen de carreras de Física e Ingeniería y de Universidades con fuertes escuelas en Ciencias Computacionales. Por lo tanto, tenemos que aceptar que las tareas y la programación hecha para el trabajo de tesis sean en el lenguaje que manejen cómodamente. Con esto, las comprobaciones y asesoramientos a cargo de un profesor limitado por el uso de un FORTRAN "antiguo" se hacen más difíciles de realizar.
- b. El uso de paquetes con procedimientos matemáticos generales (tipo MATLAB) es cada vez más común para cálculos relativamente sencillos y para visualización en el trabajo rutinario del posgrado; ésto incluye el tratamiento más común de series de tiempo. Los paquetes que realizan modelado a partir de observaciones deben ser analizados cuidadosamente para definir sus inevitables limitaciones.

Un conjunto de experimentos numéricos bien diseñados pueden definir su rango de aplicación, por lo menos, si coincide con los propósitos de su uso. Ésto indica la necesidad de incluir tópicos de Geofísica Computacional en los cursos del posgrado en los que se puede analizar los programas de uso más general, dejando a la interacción estudiante/asesor el cuidado de programas de uso más limitado.

- c. Un estudiante de posgrado de Geofísica debe conocer bien al menos un lenguaje de computación de alto nivel y manejable como C o FORTRAN. La razón es simple: se debe tender al desarrollo de programación para problemas muy específicos para los cuales comúnmente no hay herramientas adecuadas en paquetes como MATLAB y MATHEMATICA. En estos momentos, un geofísico puede realizar programación complicada utilizando rutinas cuyo código fuente (en C o FORTRAN) está a la mano casi en cualquier campo de las Matemáticas Aplicadas. Mi opinión es que esta opción es preferible a la de utilizar, por ejemplo, MATLAB debido al mayor control de la herramienta computacional resultante. De ésto, deben surgir contribuciones originales a la Geofísica Computacional y además, un estudiante de posgrado puede modificar para mejor provecho el código fuente de un paquete de programas.
- d. Lo anterior se complementa con el uso interactivo de la visualización. Es una política sana la de incentivar la formación de plataformas globales de cálculo/ visualización en estaciones de trabajo y computadoras personales. Esto no es difícil de realizar en estos momentos debido a la existencia de paquetes de distribución generalizada y gratuita que incluyen los programas fuentes. El cálculo científico con interacción gráfica resuelve en forma más fácil el análisis de problemas complicados y debe ser parte esencial de la enseñanza de las ciencias.
- e. Los cursos sobre análisis e inversión de datos son aquellos donde el estudiante debe verse obligado a desarrollar sus conocimientos de programación ya sea -preferentemente- en C o FORTRAN. Opcionalmente, el profesor puede solicitar utilizar técnicas de optimización de códigos para computadoras escalares, y debe insistir en los peligros de los cálculos con pérdida de precisión, en la aparición de soluciones extrañas por la discretización de sistemas de ecuaciones en variables continuas y en el carácter particular de los métodos numéricos.

En cuanto al uso general de "cajas negras" computacionales, parece demasiado conservadora la opinión de Duffin (1997): "Estoy convencido de que las calculadoras (y computadoras) nos hacen perezosos a lo más o incompetentes a lo menos". Más realista, flexible y basada en información empírica es la conclusión de la autora que hace la referencia anterior: "Algunos profesores parecen adoptar cualquier cosa sin pensar adecuadamente en las consecuencias. En vez de argumentar acerca del uso de las calculadoras, necesitamos una discusión a

nivel nacional para determinar qué habilidades tradicionales continúan siendo cruciales en matemáticas y cuáles otras se pueden desarrollar a través de un uso serio de la tecnología. Sólo de este modo lograremos explotar a la tecnología para nuestra ventaja" (Traducción del autor).

Algunos puntos de vista y de acción planteados en este artículo pueden ser y han sido cuestionados. Uno de sus propósitos es estimular la discusión al respecto.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo se inició con un seminario en la División de Ciencias de la Tierra del CICESE, donde hubo una activa discusión. R. Eaton cooperó con su profesional y paciente trabajo con el editor de texto. Los comentarios de los revisores ayudaron a formar un escrito más claro y compacto lo que el autor agradece cordialmente.

REFERENCIAS

- Bolt, B.A., 1970, The use of computers in studies of the earth, in A. Taub and S. Fernbach, (editores), Computers and Their Role in Science, Gordon and Breach, New York, 543-570.
- Brody, T. A., 1989, El cómputo en la investigación, Revista Mexicana de Física, 121-126.
- Burden, R. L. y J. D. Faires, 1996, Análisis Numérico, 2a. ed., G. E. Iberoamérica, 808 pp.
- Buzzi-Ferrari, G., 1993, Scientific C++, Addison-Wesley, 479 pp.
- Duffin, J., 1997, Making the most of technology: a personal perspective, The Mathematical Gazette, 541-543.
- Gil, P. E., W. Murray, and M. H. Wright, 1991, Numerical Linear Algebra and Optimization, Addison Wesley Pub. Co., 1, 426 pp.
- Gilbert, F., 1971, Ranking and winnowing gross Earth data for inversion and resolution, Geophys. J. R. Astr. Soc., 43, 125.
- Hopkins, T. R., 1996, Reestructuring software: a case study, Software-Practice and Experience, 26, 967-982.
- Lewis, T., 1996, The big software chill, Computer, March, 12-14.
- IBM, 1970, System/360 Scientific Subroutine Package. Version III. Programmer's Manual, International Business Machines Corporation, 454 pp.
- Malone, S., 1997, Electronic seismologist, Seismological Research Letters, 68, 267-271.
- Pifer, J., 1996, Are we doing our students a favor making them learn FORTRAN?, Computers in Physics, 10, 509.
- Reynolds, J.M., 1991, The need for recognized standard of applied geophysical software and the geophysical education of software users, Computers and Geosciences, 17, 1099-1104.

- Rice, J. R., 1983, Numerical Methods, Software, and Analysis, McGraw Hill, 480 pp.
- Smith, B. T., J. M. Boyle, Y. Ikebe, V. C. Klema and C. B. Moler, 1976, Matrix Eigenvalue Routines: EISPACK Guide, Springer Verlag, New York, 551 p.
- Taubes, G., 1996, Do it yourself supercomputers, Science, 274, 1840.
- Williams, K. B., 1995, Magic matrix multiply, C/C++ Users Journal, June, 19-26.
- Wilkinson, J. H. and C. Reinch, 1971, Handbook for Automatic Computation, Linear Algebra, Springer Verlag, Vol. II, 440 pp.