

Modelación matemática y computacional en hidrología: conceptos unificadores

Ismael Herrera Revilla¹

Instituto de Geofísica, UNAM

La gran diversidad de problemas que es necesario abordar para administrar el uso del agua en las sociedades contemporáneas en forma adecuada, requiere formar recursos humanos que comprendan con suficiente profundidad una gran variedad de fenómenos. El avance en la computación electrónica ha suministrado una formidable herramienta, sumamente versátil y muy útil para desarrollar y aplicar modelos matemáticos a esa clase de problemas. El uso de teorías unificadoras en la enseñanza es ahora indispensable para la formación de especialistas capaces de comprender con profundidad adecuada, la profusión de modelos que se aplican y, especialmente, que se aplicarán en el futuro.

Aunque la computadora digital en la actualidad tiene una gran variedad de aplicaciones, en buena parte su desarrollo fue provocado por la necesidad de los ingenieros y los científicos de realizar gran cantidad de cálculos de manera organizada. Aun en el presente, una fracción importante del tiempo ocupado por las computadoras se sigue dedicando a resolver problemas de la ingeniería y la ciencia. Además, las necesidades científicas e ingenieriles continúan proporcionando la motivación principal para el progreso de la computación, tanto por lo que se refiere a *hardware* como a *software*.

En los términos *modelación numérica*, se incluyen muchas actividades en las que mucha gente usa las computadoras digitales para realizar cálculos con objeto de probar hipótesis científicas, explorar sistemas matemáticos y diseñar tanto instrumentos como tecnologías. Generalmente, estas tareas involucran principios cuantitativos bien establecidos, pero cuya aplicación a problemas específicos requiere de tal cantidad de cálculos matemáticos que resulta imposible para el ser humano realizarlos de manera directa. Por ejemplo, las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el flujo de un fluido alrededor de un cuerpo sólido son bien conocidas. Sin embargo, cuando se in-

tenta resolverlas para determinar las fuerzas que el aire ejerce sobre un avión, la complejidad es tan grande, no sólo por la dificultad de las ecuaciones mismas, sino además por la presencia de irregularidades geométricas y no-linealidades, que es indispensable recurrir a métodos numéricos que permitan sustituir las ecuaciones exactas por otras que puedan ser resueltas por las computadoras electrónicas. Sólo así es posible seleccionar diseños adecuados para ser puestos a prueba en túneles de viento.

En muchas otras ramas de la ciencia y la tecnología se hace un uso similar de las computadoras electrónicas. El diseño de estructuras capaces de resistir sismos, la recuperación eficiente del petróleo, la predicción del estado del tiempo y del clima, la comprensión de la actividad tectónica de la Tierra, la predicción de avenidas o del flujo del agua subterránea, serían imposibles sin el auxilio de la computadora.

El uso y manejo del agua, en particular, han sufrido una transformación profunda bajo la influencia de las computadoras electrónicas. Problemas de carácter cada vez más diverso y más complejo han sido susceptibles de ser modelados computacionalmente. Los hidrogeólogos, en especial en los países avanzados, debido a los grandes

progresos alcanzados, se encuentran bajo una presión creciente para usar los modelos matemáticos y computacionales a fin de responder a cuestiones específicas. En los últimos 10 años, el explosivo avance del conocimiento científico de los procesos que controlan el flujo y el transporte de masa en toda clase de medios hidrogeológicos, se ha incorporado a una gran variedad de modelos. Sin embargo, no es claro hasta qué punto los modelos existentes son adecuados para realizar las tareas que se les han asignado. En los EUA esto motivó que se llevara a cabo una evaluación de las *bases científicas y la aplicabilidad* (National Research Council, 1990), de los modelos utilizados en hidrología subterránea.

En México, las autoridades y los profesionales deberíamos hacernos preguntas similares. Pero en nuestro país tales preguntas toman una connotación distinta. Por una parte, los límites del conocimiento universal y el estado de la tecnología internacional son determinantes y nos orientan respecto a lo que es necesario hacer. Pero por otra, las circunstancias específicas relativas a la disponibilidad de recursos humanos y el nivel de conocimiento de nuestro territorio y de nuestros sistemas hidrológicos son igualmente importantes.

El déficit en la disponibilidad de recursos humanos con conocimiento de los problemas y métodos del agua subterránea se incrementa con el transcurrir del tiempo, debido a la insuficiente producción de especialistas nacionales y a la rapidez del progreso internacional. La gran diversidad de modelos que ha sido necesario desarrollar para atender las necesidades prácticas, cuya variedad también está en continuo aumento, muestra un panorama tan complejo que el esfuerzo para dominarla se antoja, a primera vista, formidable. A los problemas del flujo saturado en acuíferos confinados y libres, o con intrusión salina, hay que añadir las dificultades de la modelación de los procesos de consolidación en acuitardos, o del flujo en medios no saturados, así como en acuíferos fracturados. Al aumentar la importancia de los problemas de contaminación del agua subterránea, la modelación del flujo multifásico en sistemas acuíferos se ha convertido en una necesidad, especialmente en el estudio de la contaminación debida a la presencia de fases líquidas, no acuosas, de alta densidad (DNAPLs).

Pero si los problemas del flujo son variados y complejos, aún más lo son los del transporte. En esta clase de procesos, es necesario predecir el transporte de solutos conservativos (los más

sencillos), no conservativos, con reacción química, fenómenos de adsorción, cambios biológicos como la biodegradación, transporte en la zona no saturada y en sistemas multifásicos.

Formar recursos humanos que comprendan con profundidad adecuada tal diversidad de situaciones no es tarea fácil, pero es indispensable para utilizar los recursos subterráneos de México en forma satisfactoria. Por eso es necesario adoptar métodos de enseñanza de gran eficiencia. Un ejemplo de lo que se puede hacer es la educación con puntos de vista que unifiquen los conceptos. Así, por ejemplo, en lugar de presentar por separado y como cosas enteramente diferentes, cada uno de los modelos a que se ha hecho referencia, es posible introducir marcos de referencia unificadores y mostrarlos como casos particulares de un modelo único de gran generalidad. El ahorro de esfuerzo que con esto se logra es notable y permite avanzar con rapidez en la enseñanza. A continuación se ilustra en forma sucinta este punto de vista.

Los procesos básicos

Los modelos matemáticos que se usan en estudios del agua, representan los procesos por medio de ecuaciones matemáticas. El preciso lenguaje matemático permite expresar una gran cantidad de información en forma sencilla y compacta. Además, estos modelos tienen una capacidad integradora extraordinaria, ya que del conocimiento de las propiedades del medio en cada punto y de sus formas de reaccionar localmente, es posible deducir las interacciones globales y el comportamiento del sistema en su conjunto.

Para desarrollar modelos de flujo y transporte de materia es preciso introducir los conceptos de fase y componente. Cada fase está formada por una o varias componentes. Su característica esencial es que todas sus componentes se mueven con la misma velocidad media. Así, la velocidad media de cada fase está definida en forma única. Ejemplos de sistemas de una fase son el agua pura (en cuyo caso sólo hay una componente), o el agua con alguna sustancia disuelta (e. g., cloruro de sodio), en cuyo caso hay dos componentes. Un ejemplo de un sistema de tres fases es el modelo de petróleo negro, ampliamente utilizado en la ingeniería respectiva y cuyas tres fases son: agua, petróleo líquido y gas. Cada una se mueve con su propia velocidad media. El agua y el gas son puros, pero en general en el petróleo líquido hay gas disuelto. En este caso las fases agua y

gas son de una sola componente, mientras que la fase petróleo líquido está formada por dos componentes: el petróleo no volátil y el gas disuelto.

El punto de partida de la modelación es una clara comprensión de los procesos básicos. En el caso del flujo de agua o flujo multifásico, los procesos involucrados son tres:

- El movimiento promedio (o flujo) de cada fase;
- Los flujos difusivos en cada fase;
- El intercambio de masa entre las diversas fases y componentes, así como con el exterior del sistema.

El movimiento promedio está determinado por la velocidad media, la cual es única para cada fase y se produce en respuesta a la ocurrencia de gradientes no nulos de los potenciales hidráulicos. Se les modela por medio de la Ley de Darcy y sus variantes, aplicables a sistemas de varias fases, que determinan la velocidad promedio de cada fase cuando dichos gradientes son conocidos.

A las entradas y salidas de masa de cada componente se les conceptualiza como fuentes o resúmideros. Si se acepta que las fuentes puedan tener intensidad negativa, como es habitual en la conceptualización matemática, entonces es innecesario referirse a los resúmideros en forma independiente. Cuando se modela el flujo de agua subterránea, las fuentes y los resúmideros se deben al bombeo o a la inyección. En el caso del transporte de contaminantes, el origen de fuentes o resúmideros para cada componente de las diversas fases puede ser muy diverso, principalmente por procesos químicos, nucleares y biológicos. Entre los primeros cabe anotar la sorción, el intercambio iónico y la oxidación/reducción; entre los procesos de origen nuclear, el decaimiento radiactivo. Por último, entre los biológicos está la biodegradación que ha cobrado gran importancia debido a las técnicas de rehabilitación de acuíferos basadas en ella.

Los flujos difusivos se originan básicamente por movimientos aleatorios de las partículas con velocidades diferentes a la velocidad promedio. Esto implica que si todas las partículas se movieran con la misma velocidad no habría flujos difusivos. Los flujos difusivos en el caso de los fluidos en medios porosos, se originan tanto en la difusión molecular como en la dispersión mecánica. Para incorporarlos en las ecuaciones básicas del modelo matemático, por lo general se utiliza la Ley de Fick.

Las ecuaciones básicas

La Teoría de los Sistemas Continuos proporciona el esquema general para la formulación de las ecuaciones que son la base de los modelos matemáticos usados en la hidrología subterránea. En su forma más general, que incluye a la mecánica de sólidos y líquidos, la Teoría del Continuo introduce los conceptos de propiedades extensivas e intensivas, las cuales se corresponden una a una (Herrera y Allen, 1986; Allen, Herrera y Pinder, 1988). Sin embargo, para el caso de los problemas de flujo y transporte de contaminantes en medios porosos, las propiedades extensivas que deben considerarse son las masas de las componentes de las diferentes fases que forman al sistema. En consecuencia, las propiedades extensivas correspondientes son las masas por unidad de volumen de cada una de las componentes. Esto permite hacer una presentación más sencilla y menos abstracta.

Sea $B(t)$, una región ocupada por varias fases fluidas y $\underline{v}(\underline{x}, t)$ la velocidad media de una de dichas fases. Se supone, entonces, que los puntos de la región $B(t)$ se mueven con la velocidad $\underline{v}(\underline{x}, t)$. Cuando esta condición se cumple, se dice que la fase correspondiente "conserva" las partículas de esa fase o que $B(t)$ "constituye un cuerpo para la fase considerada". Dentro de la fase considerada, se toma alguna componente y se considera $\psi(\underline{x}, t)$ su masa por unidad del volumen total de la región. Entonces, en cualquier tiempo t , la masa $M(t)$ de la componente considerada contenida en $B(t)$, es:

$$M(t) = \int_{B(t)} \psi(\underline{x}, t) d\underline{x} \quad (1)$$

En el modelo general de la mecánica de los medios continuos se considera la posibilidad de que $\psi(\underline{x}, t)$ presente discontinuidades a través de algunas superficies. El estudio de tales discontinuidades tiene importancia, ya que corresponden a ondas de choque u otros fenómenos de interés. Cuando se estudia el avance de frentes de contaminación en zonas no-saturadas, dichas discontinuidades permiten predecir la velocidad de avance de los frentes abruptos (Herrera, Gallindo y Camacho, 1991). A pesar de reconocer su relevancia, en esta presentación se excluyen esa clase de discontinuidades, en aras de la brevedad.

Un postulado básico es que la masa de una componente contenida en un cuerpo $B(t)$ de cual-

quier fase, puede cambiar de valor al transcurrir el tiempo, solamente porque haya intercambio de masa de las demás componentes con esa componente, o porque ingrese a través de su frontera proveniente de una región vecina a la región considerada. La expresión matemática de este postulado es:

$$\frac{dM}{dt}(t) = \int_{B(t)} g \, dx + \int_{\partial B(t)} \underline{\tau} \cdot \underline{n} \, dx \quad (2)$$

donde $\partial B(t)$ es la superficie o frontera que limita al cuerpo $B(t)$.

El término g bajo la integral de volumen representa la intensidad de la fuente para la componente considerada. Es la masa por unidad de volumen total, que la componente que se estudia recibe del exterior del sistema o de las demás componentes (sean éstas de la misma fase o de otras), por unidad de tiempo. Como se ha dicho, esos cambios se pueden deber a procesos químicos, nucleares y biológicos. Cuando la extracción o inyección por medio de pozos se simula en forma distribuida, el término g incluye a la masa de la componente considerada que sale a la superficie por bombeo (y a la que ingresa en la fase debido a inyección por medio de pozos). Este es un ejemplo en que el intercambio es con el exterior del sistema.

El término $\underline{\tau} \cdot \underline{n}$ bajo la integral de superficie representa el flujo difusivo de masa a través de la frontera, por unidad de área y de tiempo. Las razones por las que necesariamente tiene la forma $\underline{\tau} \cdot \underline{n}$ son parte de los resultados de la Teoría del Continuo (Herrera y Allen, 1986; Allen, Herrera y Pinder, 1988). Como ya se ha dicho, en el caso de flujo y transporte multifásico en medios porosos, los procesos que originan tales flujos son la difusión molecular y la dispersión mecánica. Para ambas, en general se acepta un modelo Fickiano, en el que $\underline{\tau}$ es una función lineal del gradiente de la concentración de la fase correspondiente. Sin embargo, la forma y magnitud de las funciones lineales correspondientes son bastante diferentes en uno y otro caso. Para la dispersión mecánica, los coeficientes de dicha función se toman en general como proporcionales a la velocidad de flujo de la fase, mientras que para la difusión molecular se les considera independientes.

A la ecuación (2) se le conoce como "la ecuación general de balance global de masa". Es global en tanto que es una relación integral que satisface la masa de cualquier componente de cualquier cuerpo. Para obtener las ecuaciones

diferenciales que constituyen la base de los modelos utilizados en hidrología subterránea, es necesario combinar dicha ecuación, con la siguiente identidad matemática:

$$\frac{dM}{dt}(t) = \int_{B(t)} \{\psi_t + \nabla \cdot (\psi \underline{v})\} \, dx \quad (3)$$

donde ψ_t es la derivada parcial con respecto al tiempo de ψ . La ecuación (3) se cumple siempre que $M(t)$ esté definida por la ecuación (1) y los puntos de la región $B(t)$ se muevan con la velocidad $\underline{v}(\underline{x}, t)$; es decir, que $B(t)$ sea un cuerpo para la fase considerada. Por otra parte, la ecuación general de balance global de masa (2), se puede escribir en forma más conveniente transformando la integral de superficie en una integral de volumen por medio del Teorema de la Divergencia. Así:

$$\frac{dM}{dt}(t) = \int_{B(t)} \{g + \nabla \cdot \underline{\tau}\} \, dx \quad (4)$$

Al comparar las ecuaciones (3) y (4), y tomar en cuenta que el cuerpo $B(t)$ es arbitrario, se puede ver que los integrandos deben ser iguales. La igualdad así obtenida es la "ecuación diferencial general de balance local de masa":

$$\psi_t + \nabla \cdot (\psi \underline{v}) = \nabla \cdot \underline{\tau} + g \quad (5)$$

Esta ecuación (5), a pesar de su sencillez, tiene gran generalidad y proporciona las ecuaciones básicas de modelos que pueden ser de gran complejidad. De ahí su importancia. Para apreciar el amplio espectro de implicaciones que tiene esta ecuación, con base en ella se pueden establecer las ecuaciones básicas de un sistema de muchas fases, cuando cada una de ellas contiene muchas componentes. Sea N el número de fases y M_α ($\alpha = 1, \dots, N$) el número de componentes que contiene la fase α . Ya que cada fase se mueve con su propia velocidad, sea $\underline{v}^\alpha(\underline{x}, t)$ la velocidad de la fase α , donde $\alpha = 1, \dots, N$. Entonces las ecuaciones básicas del sistema multifásico y de muchas componentes se obtienen aplicando la ecuación (5) a cada componente de cada fase. De esta manera se obtiene:

$$\psi_t^{\alpha\beta} + \nabla \cdot (\psi^{\alpha\beta} \underline{v}^\alpha) = \nabla \cdot \underline{\tau}^{\alpha\beta} + g^{\alpha\beta} \quad (6)$$

La ecuación (6) representa un sistema de ecuaciones, ya que $\alpha = 1, \dots, N$ y para cada α fija $\beta = 1, \dots, M_\alpha$. Se puede observar que el número

total de ecuaciones es igual al número total de componentes, es decir, $\sum_{\alpha} M_{\alpha}$.

Como una ilustración más específica, en el caso del modelo de petróleo negro antes referido, hay cuatro componentes y tres fases. Las componentes son: agua y gas, contenidas en las fases agua y gas, respectivamente; y petróleo no volátil y gas disuelto, ambas contenidas en la fase petróleo líquido. Las masas por unidad de volumen de cada una de estas cuatro componentes son $\phi S_w \rho_w$, $\phi S_g \rho_g$, $\phi S_o \bar{\rho}_o$ y $\phi S_o \rho_{dg}$, respectivamente. Aquí, ϕ es la porosidad, $S_{\gamma} (\gamma = w, g, o)$ son las saturaciones de cada una de las fases y $\rho_{\gamma} (\gamma = w, g, o \text{ y } dg)$ las densidades de las componentes respectivas. Las saturaciones por definición, son las fracciones del espacio de poro ocupadas por cada componente. En el caso del petróleo no volátil se ha escrito $\bar{\rho}_o$ para la masa de esa componente por unidad de volumen de petróleo, para distinguir esta cantidad de la densidad total del petróleo líquido, que es costumbre representar por ρ_o . Sustituyendo sucesivamente los valores de la masa por unidad de volumen de estas cuatro componentes en la ecuación (6), se obtiene:

$$(\phi S_w \rho_w)_t + \nabla \cdot (\phi S_w \rho_w \underline{v}^w) = g^w \quad (7a)$$

$$(\phi S_g \rho_g)_t + \nabla \cdot (\phi S_g \rho_g \underline{v}^g) = g^g \quad (7b)$$

$$(\phi S_o \bar{\rho}_o)_t + \nabla \cdot (\phi S_o \bar{\rho}_o \underline{v}^o) = g^o \quad (7c)$$

$$(\phi S_o \rho_{dg})_t + \nabla \cdot (\phi S_o \rho_{dg} \underline{v}^{dg}) = g^{dg} \quad (7d)$$

Aquí los términos asociados a la difusión molecular y la dispersión mecánica se han tomado como cero, ya que esto es lo habitual en el modelo de petróleo negro.

Ecuaciones constitutivas

Contar con un esquema general, claro y definido con precisión, en el que los modelos empleados en las diferentes aplicaciones se incluyan como casos particulares, es sin duda de suma utilidad. Su uso es similar al de un mapa regional; con él es posible moverse con seguridad. Pero sería un error pensar que el modelo general por sí mismo permite hacer predicciones del comportamiento de los sistemas, que es el objetivo último de los modelos matemático-computacionales. Para tener el modelo completo hay que introducir las ecuaciones constitutivas, que proporcionan toda

la información necesaria sobre las propiedades locales del sistema físico y químico.

En el caso del ejemplo considerado, las ecuaciones constitutivas corresponden a las ecuaciones de estado que determinan las densidades de los fluidos como función de la presión. En realidad es habitual considerar cinco densidades: la del agua (ρ_w), la total de la fase petróleo líquido (ρ_o), la del gas (ρ_g), así como la neta del aceite (es decir, la masa de hidrocarburos no-volátiles por unidad de volumen de petróleo líquido, y que se acostumbra representar por $\bar{\rho}_o$) y la del gas disuelto (es decir, la masa de hidrocarburos volátiles por unidad de volumen de petróleo líquido [$\bar{\rho}_{dg}$]). No todas estas densidades son independientes, sino que satisfacen las siguientes relaciones:

$$\rho_o = \bar{\rho}_o + \bar{\rho}_{dg} \quad (8)$$

y

$$\bar{\rho}_{dg} = \varepsilon \rho_o \quad (9)$$

Se debe observar que $\bar{\rho}_{dg}$ es sólo una fracción de ρ_o , por lo que $\varepsilon \leq 1$. Además, la porosidad ϕ también es una función conocida de la presión.

No es habitual considerar la velocidad media de las partículas de cada una de las fases directamente, sino que para cada una de ellas se utiliza la velocidad de Darcy (\underline{u}_{α} , $\alpha = w, o \text{ y } g$). La relación de las velocidades de las partículas con las velocidades de Darcy, está dada por:

$$\underline{u}_{\alpha} = \phi S_{\alpha} \underline{v}^{\alpha} \quad \alpha = w, o \text{ y } g \quad (10)$$

La Ley de Darcy para sistemas de varias fases es:

$$\underline{u}_l = -\frac{k k_{rl}}{\mu_l} (\nabla p_l + \gamma_l \nabla z) \quad (11)$$

donde p_l , γ_l y μ_l son la presión, el peso específico y la viscosidad de la fase "l", respectivamente; z es la altura con respecto a un punto de referencia arbitrario y \underline{k} es la permeabilidad intrínseca del medio.

Otras ecuaciones constitutivas que es indispensable introducir, son las que expresan las conductividades en función de las saturaciones y cuando los efectos de la presión capilar no son despreciables, es necesario establecer la relación funcional entre ésta y las saturaciones. Finalmente, los términos de fuente g^{γ} ($\gamma = w, g, o, dg$) se separan en términos de intercambio entre la fase formada por

el petróleo líquido y el gas, y los que corresponden a la extracción a través de pozos.

Como se mencionó, el marco de referencia descrito es de aplicabilidad general, aunque aquí se haya ilustrado con el modelo específico del petróleo negro, que en hidrología subterránea principalmente se aplica al tratamiento de los DNALP's. Debe observarse además, que este modelo es conservativo, o con mayor precisión, que no contiene reacciones químicas. En el caso de sistemas con reacción química, las propiedades químicas y de cinética química permiten determinar la parte de los términos de fuente que se originan en el intercambio de masa entre una componente y otra, debido a las reacciones químicas.

Conclusiones

Algunos de los rasgos que distinguen al pensamiento matemático son:

- La claridad,
- El rigor,
- La precisión,
- La generalidad,
- La abstracción,
- La unidad conceptual y
- La sencillez.

Cada uno de ellos desempeña un papel importante e indispensable en el desarrollo y organización del conocimiento científico. Cuando se les utiliza en forma integrada su poder es enorme y han contribuido en forma importante a la rápida transformación que está teniendo lugar a nivel mundial. La utilización de estos principios rectores es de gran valor también en la enseñanza de técnicos y científicos, ya que contribuyen a hacer el proceso educativo más eficiente y a lograr una educación más sólida.

La claridad, el rigor y la precisión producen seguridad al utilizar el conocimiento. La generalidad,

la abstracción y la unidad conceptual permiten integrar una gran cantidad de conocimientos diversos, en conceptos y esquemas de gran generalidad, con el consecuente ahorro de esfuerzo. Finalmente, la sencillez es la magia de transformar lo difícil en fácil, lo que permite acceder aun a lo más difícil.

El marco de los modelos matemático-computacionales que aquí se ha presentado, es el resultado de un esfuerzo realizado a lo largo de muchos años por los pioneros de la Mecánica de los Medios Continuos y reúne muchos de los rasgos que caracterizan al pensamiento matemático. He procurado presentarlo aquí con sencillez, para mostrar cómo la disciplina matemática del pensamiento también es útil en situaciones de enorme importancia práctica.

¹ Presidente de la Academia Nacional de Ingeniería.

Referencias

- Allen M. B., I. Herrera y G. Pinder. *Numerical Modelling in Science and Engineering*, New York, New York, John Wiley & Sons, 1988.
- Herrera I., A. Galindo y R. Camacho. "Shock Modelling in Variable Bubble Point Problems of Petroleum Engineering", *Computational Modelling of Free and Moving Boundary Problems*, Vol. 1: Fluid Flow, L. C. Wrobel and C. A. Brebbia, Eds., Computational Mechanics Publications, Southampton, U. K., Proceedings of the First International Conference, pp. 398-413, 1991.
- Herrera, I. y M. Allen. "Modelación Computacional de Sistemas en Ciencias e Ingeniería. Formulación de las Ecuaciones Básicas". *Comunicaciones Técnicas del Instituto de Geofísica*, UNAM, Serie Docencia y Divulgación No. 9, 1986.
- National Research Council. "Ground Water Models: Scientific and Regulatory Applications", Water Science and Technology Board, Committee on Ground Water Modelling Assessment, Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Resources, National Research Council, National Academy Press, Washington, D. C., 1990.