



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
**Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental**

**FLUJO Y CONTAMINACIÓN DE AGUAS  
SUBTERRÁNEAS  
(ICYA 4716)**

**PROGRAMA DEL CURSO  
SEMESTRE I, 2019**

**PROFESOR:**  
**CARLOS MOLANO**  
[cmolano@uniandes.edu.co](mailto:cmolano@uniandes.edu.co)

# FLUJO Y CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

## ANTECEDENTES

Hoy en día el estudio del agua subterránea se ha convertido en un área fundamental en el ejercicio profesional de diversas disciplinas para un sinnúmero de aplicaciones. En el área de recursos hídricos desde el estudio y análisis para la captación de agua subterránea a través de un pozo, bien sea para uso doméstico, industrial o para riego, hasta el manejo de un campo de pozos, como en el Piedemonte Llanero, algunas zonas del Caribe (Sincedejo y Santa Marta, por ejemplo), el Valle del Cauca, ó la Sabana de Bogotá, y muchas zonas más, en donde se tienen cientos a miles de pozos interactuando entre sí, del cual dependen decenas de miles de usuarios, para abastecimiento de agua potable, para uso industrial y agrícola, aspectos indispensables para el sustento del ser humano, el desarrollo y la sostenibilidad de la economía de una región y del mismo país. Con el desarrollo intensivo de este recurso, de la industria, las prácticas agrícolas, el cambio del uso del suelo, comienza a interactuar el agua subterránea con el resto del medio ambiente, con diverso tipo de ecosistemas, de manera que su uso sostenible en condiciones ambientalmente sanas, es crucial para garantizar que los bienes y servicios que este recurso nos ha brindado, siga disponible tanto para las generaciones presentes como futuras. Además, el agua es esencial para la preservación del ser humano, para el desarrollo y sostenimiento socioeconómico, y para la preservación de diversos recursos naturales; es decir, necesitamos el agua para vivir y progresar, y para ser felices. De manera que siendo el agua subterránea el recurso de agua aprovechable mas abundante en la naturaleza, y de mayor uso a nivel mundial, es una necesidad y un deber de los profesionales de la hidrogeología, hacer que se aproveche en forma eficiente y sostenible.

El campo de acción de los profesionales del agua subterránea es muy diverso en nuestro país: para abastecimiento de agua (como se describió anteriormente), incluyendo ingenieros civiles, geólogos, hidrólogos, profesionales de ciencias de la tierra, planificadores, economistas, etc.; en evaluación ambiental de sitios contaminados, y remediación de suelos y aguas subterráneas, en donde además se interactúa con otras disciplinas como la ingeniería ambiental, química, biología, ecología, etc. El 95% de los humedales y los cauces superficiales en épocas de estiaje dependen del agua subterránea, en donde estos ecosistemas son fundamentales para la preservación del hábitat y de una gama muy amplia de subsistemas, teniendo un papel muy importante la ecohidrología, la biología e hidrogeología de la zona hiporreica, la vegetación riverena, etc.; por otra parte, es una necesidad preservar los caudales mínimos ecológicos que dependen en su mayor parte del agua subterránea. En prevención, análisis de riesgo y evaluación de zonas contaminadas, con frecuencia hay que interactuar con toxicólogos, epidemiólogos, y con abogados ambientalistas. En la industria minera, tanto para el drenaje de las zonas a minar como el impacto producido por el mismo drenaje, las zonas de disposición de materiales y de residuos, es un campo muy amplio para todo tipo de profesionales del agua subterránea. En geotecnia de taludes y subsidencia de terrenos, el agua subterránea juega un papel muy importante, son cientos los pozos que han colapsado en nuestro país por problemas de subsidencia del terreno, como también el agrietamiento y colapso de edificaciones; algunas zonas de inundación se han originado también por problemas de este tipo. En la industria petrolera, tanto para el agua que se requiere para la exploración, explotación y proceso, como en la disposición de residuos líquidos y sólidos que pueden afectar el suelo y el agua subterránea. En la recuperación secundaria de hidrocarburos, y el aprovechamiento no convencional de hidrocarburos, como el fracturamiento hidráulico (fracking) se requiere evaluar muy bien las condiciones hidrogeológicas para prevenir la contaminación del agua subterránea.

De manera que la hidrología e hidráulica subterránea, se ha convertido en un vínculo central entre una diversidad de disciplinas asociadas al agua subterránea, como los recursos hídricos, las ciencias de la tierra, la ingeniería ambiental, la gestión y uso del suelo, la exploración y explotación de minerales y petróleo, la geotecnia, geotermia, arquitectura del paisaje, ecohidrología, ecología subsuperficial, ciencias biológicas, etc. No se espera que las otras disciplinas conozcan lo que la hidrogeología les puede ofrecer; es el profesional del agua subterránea quién debe entender y aprender las necesidades de las otras disciplinas.

## FLUJO Y CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

**OBJETIVOS.** Este curso está dirigido al estudiante de los últimos semestres de Ingeniería Civil y Ambiental, Geociencias, a estudiantes de posgrado en Recursos Hidráulicos, Suelos y Geotecnia, y otras disciplinas conexas como, Ingeniería Química, Ciencias Biológicas, entre otras. Tiene como objetivo dar al estudiante los principios básicos de la hidrogeología, los conceptos y mecanismos que rigen el movimiento y almacenamiento de agua y constituyentes químicos en medios porosos. Se dan ejemplos reales y aplicaciones prácticas a que un profesional se puede ver enfrentado, dando soluciones y lineamientos a problemas de flujo y contaminación de aguas subterráneas, no solamente teniendo en cuenta los cálculos analíticos y numéricos, sino incluyendo la interrelación de la Hidrogeología con el resto del medio ambiente.

1. Introducción. Importancia del Agua Subterránea en Colombia y en el Mundo. (semana 1)
2. Conceptos generales. Elementos de Geología. Clases de Acuíferos. Ley de Darcy. (semana 1)
3. Flujo y transporte advectivo estacionario en una dimensión (Semana 1 y 2)
  - Flujo en Acuíferos confinados
  - Flujo en acuíferos libres
  - Flujo en acuíferos semiconfinados
  - Flujo en acuíferos heterogéneos
  - Simulación numérica por diferencias finitas
4. Flujo y transporte advectivo estacionario en dos dimensiones (Semana 3)
  - Redes de flujo
  - Simulación numérica
  - Aplicaciones en transporte y contaminación
  - Análisis de sistemas de flujo (regional, intermedio, local)
  - Aplicaciones en protección ambiental, Eco-hidrología, vulnerabilidad y riesgo
5. Flujo transitorio unidimensional y bidimensional (semana 4)
  - Soluciones analíticas unidimensionales
  - Soluciones numéricas en una dimensión, dos y tres dimensiones
6. Flujo estacionario radial (semana 5)
  - Acuíferos confinados
  - Acuíferos libres
  - Acuíferos semiconfinados
  - Pérdidas de carga hidráulica en pozos de bombeo
  - Principio de superposición. Aplicación a flujo y contaminación
7. Flujo transitorio radial y pruebas de bombeo (semana 6)
  - Acuíferos confinados
  - Acuíferos semiconfinados
  - Pruebas escalonadas
  - Localización hidráulica de límites hidrogeológicos
8. Diseño de pozos de bombeo y monitoreo (Semana 6-7)
  - Diseño hidráulico y mecánico de Pozos de Bombeo
  - Diseño de piezómetros y pozos de monitoreo
  - Pruebas por pulsos (slug)
9. Transporte de constituyentes químicos en medios porosos. (Semana 8)
  - Transporte advectivo y dispersivo
  - Soluciones analíticas en una dimensión
  - Soluciones numéricas en una dimensión
  - Soluciones analíticas y numéricas en dos dimensiones
  - Soluciones analíticas en tres dimensiones
10. El agua subterránea y la geotecnia (Semana 9)
  - Subsistencia de terrenos
  - Estabilidad de Taludes
11. Principios de hidrogeoquímica. (Semana 10)
12. Principios de flujo multifase (semana 10-11)
  - Flujo en acuíferos costeros
  - Flujo con densidad variable
13. Remediación, vulnerabilidad, Riesgo e Hidrogeología forense (semana 11-12)
14. Principios de flujo y transporte en la zona no saturada (Semana 13)
  - Modelos analíticos
  - Modelos numéricos
15. Introducción a los elementos finitos en hidráulica subterránea (opcional)
16. Visita de campo (opcional)
17. Práctica de laboratorio (Visita y práctica opcional)

## Evaluaciones

Trabajos y quizzes: 20%  
Exámenes parciales: 60%  
Examen final: 20%

## Revistas Periódicas:

GROUND WATER JOURNAL	WATER WELL JOURNAL
GROUND WATER MONITORING REVIEW AND REMEDIATION	WATER RESOURCES RESEARCH
REVISTA LATINOAMERICANA DE HIDROGEOLOGÍA	ADVANCES OF WATER RESOURCES
ENVIRONMENTAL GEOLOGY	JOURNAL OF HYDROLOGY
CHEMICAL GEOLOGY	VADOSE ZONE JOURNAL
TRANSPORT IN POROUS MEDIA	STOCHASTIC HYDROLOGY AND HYDRAULICS
CONTAMINANT HYDROLOGY	HIDROGEOLOGIE
JOURNAL OF HYDROGEOLOGY	

## Libros de Referencia:

Groundwater, 1979. R. Allan Freeze and John A. Cherry. Prentice-Hall. Englenwood Cliffs  
Applied Ground Water Modeling (2<sup>nd</sup> edition): Flow and advective transport. 2015. Mary P. Anderson, William W. Woessner y Randall J. Hunt 2015  
Physical and Chemical Hydrogeology. DOMENICO, P.A. y F.W. SCHWARTZ, 1997. Jhon, Willey & Sons, New York  
Fundamentals of Ground Water, 2002 by Franklin W. Schwartz and Hubao Zhang  
Ground Water and Wells, Driscoll, 1987.. Johnson.  
Groundwater Hydrology. 3<sup>rd</sup> Edition by David Keith Todd y Larry W. Mays  
Hydraulics of Groundwater, Jacob Bear. 1979. McGraw-Hill, New York  
Hydrogeology and Groundwater Modeling, Second Edition, 2006 by Neven Kresic  
Bioremediation and Natural Attenuation ALVAREZ PEDRO E ILLMAN WALTER. 2006.. Process fundamentals and Mathematical Models, New Jersey, Willey – Interscience.  
Hidrología Subterránea Emilio Custodio y Ramón Llamas. Ed. Omega. 1978  
Modeling Groundwater Flow and Polution. BEAR, J. Y A. VERRUIJT, 1987.. D. Reidel, Dordrecht.  
Introduction to Groundwater Hydraulics. BENNET, G. U.S. Geo. Surv. Book 7. 1.978  
Evaluación por análisis de pruebas de bombeo. KRUSEMAN,G. y N. DE RIDDER. 1970.. ILRI, Wageningen  
Groundwater Resource Evaluation WALTON,W. 1970.  
Groundwater Mechanics. STRACK, O.D.L., 1987. Prentice Hall, Eng. Cliffs, N.J.  
Theory of Groundwater Flow VERRUIJT,A., 1982.. Mcmillan, London.  
Computational Methods in Subsurface Flow. HUYAKORN,P.S. y G.F. PINDER. 1983. Academic Press, New York.

## Otros Libros

APPELO, C.A.J. y D.POSTMA, 1993.. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.  
ABRAMOWITZ,M. y STEGUN I.A.,1965.Hanfbok of Mathematical Functions,Dover, New York.  
ALLEN, M., G. PINDER e I. HERRERA, 1988. Numerical Modeling in Science and Engineering, John Wiley & Sons.  
ANDERSON,M. y W. WOESNER, 2015 Ground Water Modeling (: Flow and advective transport.  
ARAVIN, V. y NUMEROV, S.N., 1965. Theory of Fluid Flow in Undeformable Porous Media, Daniel Davey, New York.  
BACHMAT Y, BREDEHOEFT J, ANDREWS B, et al. Groundwater management: The use of numerical Models, 1980.  
BEAR, J. "Physical Principles of Water Percolation and Seepage". UNESCO. Paris. 1.968  
BEAR, J., 1.972. Dynamics of fluids in Porous Media, Elsevier, New York.  
BEAR, J. Y Y. BACHMAT, 1988 Introduction to Transport Phenomena in Porous Media,D. Reidel, Dordrecht .  
BOUWER, H. "Groundwater Hydrology". McGraw Hill. New York. 1.978  
DAGAN, G. 1990. Ground Water Flow and Transport.  
De WIEST R. "Geohydrology". Wiley. New York. 1.965  
DAVIS,S.N. Y R. DE WIEST. 1966 Hydrogeology. Wiley, New York.  
DE MARSILLY: Quantitative Hydrogeology  
DOMENICO, P.A. y F.W. SCHWARTZ, 1997. "Physical and Chemical Hydrogeology". Jhon, Willey & Sons, New York  
ESCUELA DE INGENIEROS MILITARES. "Agua Subterránea y Perforación de Pozos". Escuela de Ingenieros Militares. Bogotá. 1.985  
FETTER, C.W.2001. Applied Hydrogeology. Prentice-Hall  
FETTER, C.W.1999. Contaminant Hydrogeology. Prentice Hall  
HARR, M. "Groundwater and Seepage". McGraw Hill. New York. 1.962  
HUISMANN, L. "Groundwater Recovery". McMillan. London. 1.972  
JAVANDEL, I., C.DOUGHTY Y C.F. TSANG.1984. Groundwater Transport. Am. Geophys. Union, Washington.  
LIGGET,J.A. Y P. LIU., 1983. The Boundary Integral Equation for Porous Media Flow. Allen & Unwin, London.  
PINDER,G. y W. GRAY. Finite Elements in Surface and Subsurface Hydrology. Academic Press, New York.  
QUINTERO, J. "Hidráulica de Pozos". Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. (sin fecha)  
POLUBARINOVA-KOCHINA,P.YA., 1952. Theory of Groundwater Movement (en Ruso originalmente), Gotekhizdat, Moscu. Trad. Inglés R. de Wiest, Princenton, 1962.  
REMSON,I. G.M. HORNBERGER, Y F.J. MOLZ. 1971. Numerical Method in Subsurface Hydrology. Willey Int. New York.  
WILLIS,R. y W.W-G. YEH, 1987. Groundwater Systems Planning & Management. Prentice-Hall, Eng. Cliffs, N.J.  
Zijl, W. and M. Nawalany. 1993. Natural Groundwater Flow. CRC Press.

Profesor: CARLOS E. MOLANO C.  
e-mail: [cmolano@uniandes.edu.co](mailto:cmolano@uniandes.edu.co), tel. of. 271 90 33

## Comentarios sobre los cursos de Carlos Molano

Las soluciones analíticas y sus combinaciones lineales son esenciales para el aprendizaje y la comprensión de la variada casuística de la hidrología subterránea y también para su aplicación a situaciones reales tras una modelación conceptual que lleve a una simplificación que conserve los rasgos esenciales. Los métodos gráficos han sido y son de gran utilidad para estas cuestiones, pero adolecen de lentitud, poca versatilidad y engorro. El tratamiento con herramientas informáticas sencillas, como la hoja de cálculo, que actualmente gran parte de los estudiantes y profesionales jóvenes dominan como algo común, permite abordar muy variados problemas desde la propia concepción y planteamiento. Con esas herramientas se agiliza notablemente la realización de ajustes para obtener parámetros, para realizar cálculos y para hacer análisis de sensibilidad. Este es el campo en el que el Dr. Carlos Molano, aunando su experiencia docente y profesional, ha dado un significado y muy útil paso adelante al proponer y mostrar cómo se puede abordar con una hoja de cálculo un amplio abanico de situaciones hidrogeológicas. Con ello se pone en manos de los hidrogeólogos, en su más amplio sentido, una herramienta poderosa y muy apropiada a las actuales generaciones de estudiantes, investigadores y profesionales.

### **Dr. Emilio Custodio**

Real Academia de Ciencias de España y profesor-catedrático emérito de hidrología subterránea, en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona

Le escribo para agradecerle por el curso de aguas subterráneas. Un tema muy interesante y más con la metodología en que usted lo enseña. Tanto que es uno de los temas que estoy considerando para el doctorado.

### **N. Rodríguez Jeangros**

Estudiante de Ingeniería Civil. Universidad de Los Andes.

I've had the pleasure of listening to Prof. Molano presenting his GROUND WATER SPREADSHEETS model. I was truly impressed by the effectiveness of this tool for solving complex groundwater flow and contaminant transport problems. It's a cheap, easy to use, powerful tool for Hydrogeology teaching research and practice. It also helps to understand concepts. No complex programming is required and it is suitable for use by Bachelor students, practitioners and researchers, as well as for continued education short courses. I highly recommend this tools and the courses offered by Professor Molano.

### **S. Majid Hassanizadeh**

Professor of Hydrogeology, Utrecht University, The Netherlands.

El empleo de las hojas de cálculo en hidrogeología, que introdujo, desarrolló y difundió el Dr. Carlos Molano, representa un magnífico avance en la solución de problemas de diferente complejidad en la hidrodinámica subterránea, especialmente en el campo de la geohidrología ambiental. A su eficiencia, practicidad y versatilidad es necesario añadir la fácil aplicación.

Con alto grado de solvencia, esta herramienta resulta increíblemente útil en la reproducción visual del flujo y transporte de solutos miscibles o no-miscibles en el medio acuífero, permitiendo la simulación de diferentes alternativas de mitigación de efectos. En nuestro medio es aplicada tanto en el ámbito de la investigación científica y la enseñanza superior, como en la actividad de consultoría, con muy buenos resultados. Creo que el aporte del colega Molano es uno de los más trascendentes de reciente desarrollo.

### **Dr. Mario A. Hernández**

Profesor Emérito Universidad Nacional de La Plata UNLP (Argentina)

Titular Cátedra de Hidrogeología UNLP

Director de la Carrera de Maestría en Ecohidrología UNLP

Las hojas de cálculo electrónico que presenta el Profesor Carlos E. Molano son el resultado de sus más de 30 años de experiencia en la enseñanza y práctica profesional de la Hidrogeología. El gran valor de su contenido, es que el autor presenta problemas complejos, como la modelación de zonas de captura y el flujo regional de aguas subterráneas, en una forma clara y sencilla. El usuario podrá estudiar, resolver y aplicar problemas, que hasta ahora requerían programas especializados, con la sencillez de las hojas electrónicas de amplia disponibilidad.

### **Sergio E. Serrano, Ph.D.**

Emeritus Professor of Hydrologic Science & Engineering

Department of Civil & Environmental Engineering

Temple University

I really nice and good work, Toth in a spreadsheet in such detail and so finely commented to bring the great idea of Toth to insight in groundwater behavior and its impact on the natural environment. With my sincere complements

### **Theo Olsthoorn**

Hydrologist at Waternet and Professor at Delft University of Technology

The Netherlands