

Chiffres: Conductivité en  $\mu\text{S/cm}$

♦♦ Sel de la dernière pluie

◇◇ Deposites des sels plus anciens

|||| Solution des sels par altération

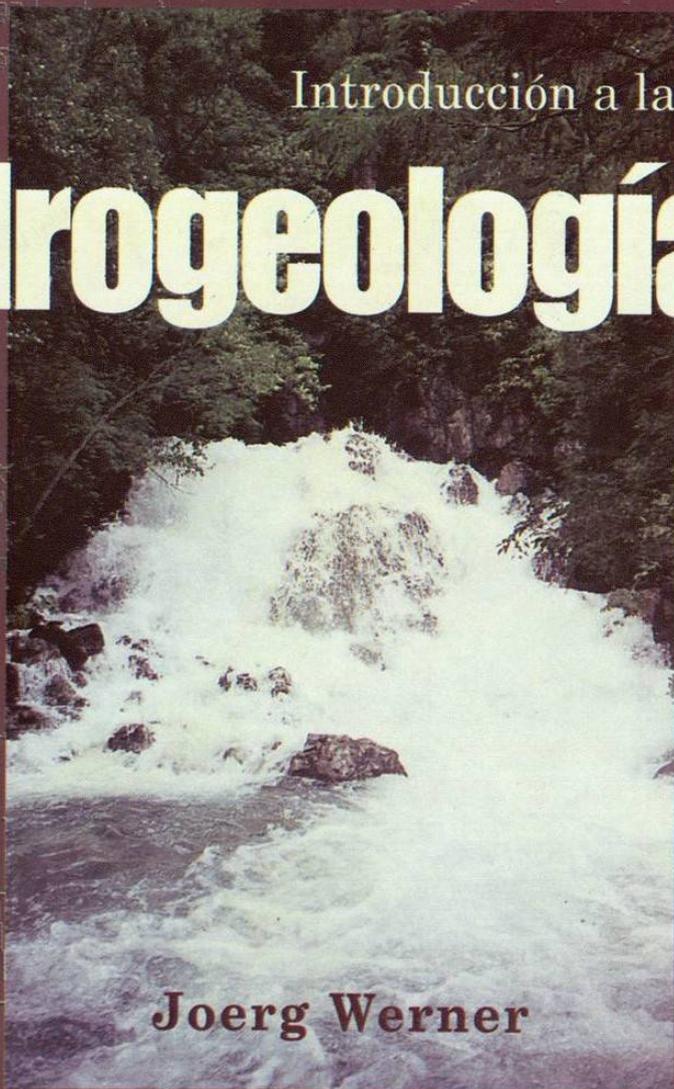
**Universidad Autónoma de Nuevo León**  
(pedogène, hydrothermale)

**Facultad de Ciencias de la Tierra**

**H**

Introducción a la

# hidrogeología



**Joerg Werner**

primera edición, 1996  
Linares, Nuevo León, México.

*Eaux profondes*

W4

C

GE100

UANL

FCT

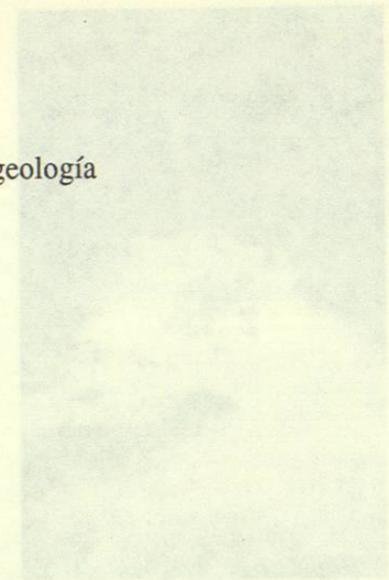
Introducción a la **Filología**

**Josef** **Werner**



1080066373

Introducción a la Hidrogeología



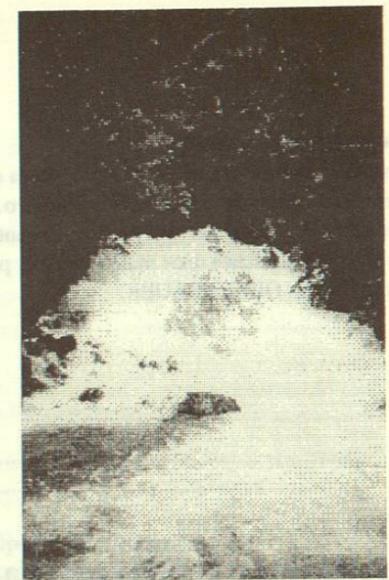
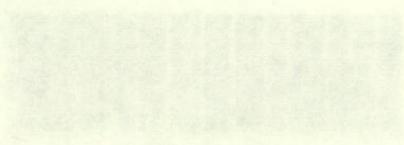
Introducción a la  
**Hidrogeología**  
Joerg Werner

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ciencias de la Tierra

Linares, Nuevo León, México

primera edición, 1980

Introducción a la Hidrogeología



Introducción a la  
**Hidrogeología**  
Joerg Werner



Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ciencias de la Tierra  
Linares, Nuevo León, México.

primera edición, 1996

GB1003

iv

.2  
W4

**Fotografía de la portada:**

manantial intermitente brotando de la cueva cárstica "Volcán de Jaurez", Cañon Santa Rosa, Sierra Madre Oriental, Linares, N.L., México.— Durante sequías el nivel freático se encuentra 22m debajo del nivel del arroyo seco. Durante el tiempo de las lluvias veraniegas sale un río con un caudal de hasta unos metros cúbicos por segundo. Véase figuras 34 y 129.

Fotografía: M. GUSENBAUER.

**Introducción a la Hidrogeología**

Joerg Werner

Primera edición, 1996



Formado en el Centro de Apoyo y Servicios Académicos, UANL.

Diseño gráfico: José Luis Martínez Mendoza

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito del titular del Copyright.

© Universidad Autónoma de Nuevo León, México, 1996.

Editado por:

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ciencias de la Tierra

ISBN 968-6337-89-X

Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL.

Hacienda de Guadalupe,

Linares, Nuevo León, México.

**Contenido**

<b>Hidrología y Geología de aguas subterráneas</b> .....	1
El agua subterránea en el ciclo hidrológico .....	3
El ciclo hidrológico / 3	
Precipitación, evaporación, escurrimiento superficial y subterráneo / 4	
La vegetación en el ciclo hidrológico. Evapotranspiración / 5	
Evapotranspiración (evaporación) real y potencial / 6	
Almacenes en el ciclo hidrológico / 6	
Agua fuera del ciclo hidrológico ("Aguas geológicas") / 7	
Sistemas hidrogeológicos / 8	
Los parámetros de los sistemas hidrogeológicos / 9	
La ecuación de balance de agua. Almacenamiento / 12	
La recarga del agua subterránea por precipitación / 13	
Conceptos de agua en la hidrogeología. Definiciones / 14	
<b>El acuífero</b> .....	17
Definición. Conceptos / 17	
Tipos de acuíferos litológicos / 18	
Porosidad. Definición general / 19	
Permeabilidad / 19	
Anisotropía e Inhomogeneidad / 21	
Tipos y conceptos hidrodinámicos / 21	
Pisos de agua subterránea / 23	
Sistemas de flujo de aguas subterráneas / 24	
<b>Las descargas de agua subterránea</b> .....	26
Tipos de manantiales / 26	
Descargas artificiales / 28	
<b>Piezometría</b> .....	29
El nivel piezométrico y su medición / 29	
La carta piezométrica y su construcción. Cálculo del gradiente piezométrico / 30	
Configuraciones varias de la carta piezométrica. Problemas en su construcción / 32	
Las variaciones meteorológicas del nivel piezométrico / 37	
<b>Geohidráulica</b> .....	43
El flujo del agua en el acuífero .....	45
La ley de DARCY / 45	
Aplicación de la ley de DARCY en el campo / 47	
El potencial hidráulico. Flujo de agua subterránea en tres dimensiones / 48	
La conductividad hidráulica de acuíferos de poros / 50	

Los límites de la ley de DARCY / 51	
Conductividad hidráulica-permeabilidad intrínseca / 54	
La anisotropía de permeabilidad / 56	
Transmisividad (y transmisibilidad) / 56	
Coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico / 57	
La velocidad de flujo del agua subterránea (sobrevista) / 59	
Concepciones de porosidad y de capacidad de almacenamiento / 62	
<b>El pozo en el acuífero</b> ..... 65	65
El cono de abatimiento en el acuífero libre / 65	
El pozo en el acuífero confinado / 68	
El pozo artesiano / 69	
El ensayo de bombeo como método hidrogeológico / 70	
La presión de acuífero y el nivel piezométrico / 79	
<b>La geohidráulica de los acuíferos de grietas y cársticos</b> ..... 84	84
Las rocas consolidadas como acuíferos / 84	
Volumen de cavidad ("porosidad") / 85	
Permeabilidad / 85	
Heterogeneidad, anisotropía y el volumen representativo elemental / 86	
Anisotropía horizontal y vertical / 87	
Dirección de potencial — Dirección de flujo / 87	
Velocidades de flujo / 87	
Validez de la ley de DARCY. Determinación de parámetros de acuífero / 89	
Modelo de dos porosidades. Modelo de capa conductora y almacenadora / 89	
El problema de la conexión al acuífero / 90	
<b>El agua subterránea y el transporte de sustancias</b> ..... 91	91
La dispersión / 91	
El ensayo de trazador como método hidrogeológico / 93	
<b>Hidrogeoquímica</b> ..... 99	99
<b>Los procesos químicos principales en los sistemas de flujo de agua subterránea</b> ..... 101	101
Disolución de sustancias sólidas / 101	
La conductividad eléctrica / 103	
Disolución de gases / 104	
Oxidación y reducción / 104	
Intercambio catiónico / 106	
El pH y sus cambios / 107	
Disolución de carbonato — el proceso de carstificación / 107	
<b>El análisis químico y la clasificación de aguas subterráneas</b> ..... 110	110
El análisis hidrogeoquímico / 110	
La toma de muestras de agua subterránea para el análisis químico / 110	
La clasificación química de aguas subterráneas / 112	

<b>Los constituyentes químicos principales de las aguas subterráneas</b> ..... 114	114
Total de sólidos disueltos / 114	
Cationes / 115	
Aniones / 116	
La Sílice / 118	
Constituyentes menores / 119	
Gases disueltos / 120	
<b>Evaluación y presentación de resultados de análisis químicos</b> ..... 123	123
Concentración equivalente (meq/l) / 123	
Balance de Iones / 123	
Presentación de los resultados en diagramas y cartas / 124	
Cálculo de aguas de mezcla / 129	
<b>Isótopo-Hidrología</b> ..... 132	132
Estudios isotópicos en la hidrogeología / 132	
Propiedades químicas y físicas de los isótopos de un elemento / 132	
Los isótopos estables de la molécula de agua / 133	
Isótopos radioactivos en el agua subterránea / 140	
<b>Hidrogeotermia</b> ..... 143	143
<b>La temperatura del agua subterránea</b> ..... 145	145
Generalidades / 145	
Conceptos geotérmicos básicos / 146	
El factor climático / 146	
El factor geotérmico / 149	
Ejemplos para la utilización de la temperatura de aguas subterráneas en la metodología hidrogeológica / 151	
<b>Temas específicos</b> ..... 153	153
<b>Hidrogeología comparativa de las zonas climáticas</b> ..... 155	155
Generalidades / 155	
La recarga / 155	
La mineralización / 157	
<b>Carstificación e hidrogeología de Carst</b> ..... 158	158
Carstificación / 158	
Fenómenos de carst / 158	
Propiedades de los acuíferos cársticos / 164	
<b>Bibliografía</b> ..... 165	165
<b>Índice alfabético</b> ..... 168	168

Prefacio

Presentación

La presente obra es el resultado de más de treinta años de experiencia del Dr. Joerg Werner Paulus en proyectos de investigación y cursos impartidos en diferentes instituciones alemanas, particularmente en el Servicio Geológico Estatal de Baden-Wuerttemberg, así como de los últimos años en la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León en México.

La aportación de este libro de texto *Introducción a la Hidrogeología* para la enseñanza y consulta de estudiantes de licenciatura, maestría y especialidades afines es de gran valor, ya que en él se tocan tópicos de gran interés y de actualidad de la hidrogeología, además de ayudar al entendimiento de uno de los recursos naturales más importantes, como lo constituyen las aguas subterráneas.

Esta publicación tiene una marcada importancia debido a la escasez de la literatura especializada en idioma español y puede ser de apoyo para la preparación de profesionistas de las geociencias en países de habla hispana.

Dr. Cosme Pola Simuta  
Director de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL.

El uso de esta obra requiere de conocimientos básicos en física y química, así como de geología general. Éstos se pueden adquirir consultando una amplia gama de libros de texto presentados en cualquier biblioteca especializada en el ramo de la ingeniería. Para la geografía por favor consultar a JEBT y JUDSON (1986) o BL/TH y FELTUS (1987) en bibliotecas, mejor todavía del inglés.

## Prefacio

Los caminos y el comportamiento de las aguas subterráneas, generalmente invisibles y por ello considerados como algo misterioso desde tiempos inmemoriales, son el objetivo de la hidrogeología.

He tratado de presentar esta materia complicada en una forma concisa mas bien ilustrada en esta *Introducción a la Hidrogeología*. El presente volumen tiene como fundamento los cursos *Hidrogeología I y II*, incluyendo prácticas de campo y de laboratorio, impartidos entre los años 1992 y 1995 en la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, N.L., México. La determinación de publicar mis escritos se motivó debido a la escasez de libros de texto de hidrogeología en el idioma español disponibles y actuales.

La presentación de la materia se fundamenta en la literatura citada en el texto, así como en mis experiencias, que se han acumulado durante tres décadas de trabajo como hidrogeólogo en el Servicio Geológico Estatal de Baden-Württemberg, Freiburg, Alemania, y durante los últimos cinco años, tiempo en el cual he tenido el gusto de estudiar la fascinante hidrogeología regional del noreste de México y de enseñar e investigar en la U.A.N.L.. Los ejemplos que el lector encontrará en el texto, son en su mayoría de mis áreas de trabajo.

La obra servirá para introducir en forma breve a la hidrogeología, no solo a los estudiantes de la geología y de las demás ciencias de la tierra, sino también a los de áreas afines, tales como la ingeniería civil e hidrología, así como a ecólogos sin formación en hidrogeología que quieran familiarizarse con el estudio del agua subterránea.

El uso de esta obra requiere de conocimientos básicos en física y química, así como de geología general. Estos se pueden adquirir consultando una amplia gama de libros de texto presentes en cualquier biblioteca especializada en el ramo de la ingeniería, para la geología por ejemplo LEET y JUDSON (1986) o BLYTH y FREITAS (1989, ver bibliografía), ambos traducidos del inglés.

## Hidrología y Geología de aguas subterráneas

El objetivo en los cursos *Hidrogeología I y II* fue la hidrogeología general. Por eso también en esta obra me limito a este estudio, dejando aparte el amplio campo de la hidrogeología aplicada o de la hidrogeología ambiental.

Para estudios más profundos, el lector debe utilizar libros de texto de hidrogeología detallados, por ejemplo CUSTODIO y LLAMAS (1983), FREEZE y CHERRY (1979, en inglés) o DAVIS y DE WIEST (1971, en traducción del inglés), así como la literatura especial citada en el texto. A pesar de estar más vesado en la literatura hidrogeológica alemana, he tratado de sustituirla por títulos anglosajones, debido a que la literatura alemana no es muy accesible a la mayoría de los lectores de habla española.

Agradezco mucho a mis colegas y amigos mexicanos Ing. Geol. Alberto DE LEON, M.C. Martín RANGEL y Dr. Juan Manuel RODRIGUEZ por sus contribuciones muy valiosas, llevando a cabo la corrección lingüística y profesional detallada de la obra.

Además me siento muy obligado con el Lic. José Luis MARTINEZ de la Facultad de Artes Visuales de la Universidad Autónoma de Nuevo León por encargarse de la creación gráfica y de la edición de la obra. Me dio mucho gusto trabajar con él.

Hacienda Guadalupe, Linares N.L.  
Febrero de 1996.

Joerg Werner

*Pasan los claros ríos y las fuentes  
 y pasan los arroyos bullidores:  
 nunca a su origen vuelven las corrientes,  
 que entre guijas nacieron y entre flores:  
 con incesante afán y con presura  
 buscan allá en el mar su sepultura.*

José Joaquín Pesado  
*Vanidad de la gloria humana (Canto de Netzahualcóyotl)*

¿de veras nunca vuelven?

## El agua subterránea en el ciclo hidrológico

### Hidrología y Geología de aguas subterráneas

#### El ciclo hidrológico

Fue descubierto hasta el siglo 17 por los científicos franceses FERRIET y MAROTTE (Figura 1). Sus mediciones de la altura de precipitación anual en la fuente del río Sena y la estimación del caudal de este río, así como las mediciones de agua infiltrada en el subsuelo, realizadas en un sótano, los condujeron a la conclusión de que las aguas subterráneas y fluviales se originan exclusivamente en las lluvias y no como se suponía anteriormente en modo especulativo, en el mar por razones térmicas o salinarias.

Para el balance global de agua vale: Precipitación P = Evaporación E, si no existe un cambio de almacenamiento.



Figura 1. Esquema del ciclo hidrológico. E = Evaporación, P = Precipitación. El agua subterránea en la tierra viene en su totalidad de la precipitación. Según CASTANY (1980).