

## **Definición e identificación de los indicadores hidroambientales.** **Definition and identification of hydroenvironmental indicators.**

Geol. BSc. L.F. Molerio León

Grupo de Aguas Terrestres, Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, P.O. Box 6219, Habana 6, CP 10600, Ciudad de La Habana, Cuba, Teléfono (53-7) 66 2383,

Fax (53-7) 33 3820.

E-mail: [leslie@cesigma.com.cu](mailto:leslie@cesigma.com.cu)

### **Resumen**

Los métodos para la evaluación de todos los impactos posibles de los proyectos hidráulicos, están aún en proceso de desarrollo. Los problemas del análisis, interpretación y presentación son inmensamente complejos cuando un proyecto debe ser evaluado para satisfacer varios objetivos y numerosos impactos. En general, los factores a considerar usualmente incluyen temas del desarrollo económico nacional, la calidad ambiental, el desarrollo regional y el impacto social.

En esta contribución se discute el concepto de indicador hidroambiental y se presenta el diseño de sendas matrices de impacto ambiental sobre el régimen y la calidad de las aguas subterráneas, respectivamente. Estas tienen el objetivo de ofrecer una aproximación a la cualificación de los efectos favorables o no deseados, indistintamente, de las acciones antrópicas sobre los acuíferos. Este artículo es una síntesis de los capítulos Indicadores Ambientales y Evaluación de Impactos sobre las Aguas Subterráneas, del Curso Itinerante de Postgrado sobre Protección de Acuíferos y del Curso de Postgrado sobre Ecohidrología, respectivamente, impartidos por el Grupo de Aguas Terrestres del Instituto de Geofísica y Astronomía.

### **Abstract**

Methods for the assessment of all possible impacts of the hydraulic projects still in development. Problems concerning the analysis, interpretation and presentation are truly complex when a project has to be evaluated for the satisfaction of various goals and meets numerous impacts. Commonly, factors involved are mainly related with the national economic development, the environmental quality and the social impact.

This paper discusses the concept of indicator for aquatic environment and presents the structure of two matrixes for environmental impact assessment on the regime and quality of ground waters. These matrixes intends to asses qualitatively the favourable or undesired effects of human actions on aquifers. The paper is a synthesis of the chapters Environmental Indicators and Environmental Assessment of Groundwater Impacts, of the Postgraduate Itinerant Course on Aquifer Protection and of the Postgraduate Course on Ecohydrology, respectively, lectured by the Group of Terrestrial Waters of the Institute of Geophysics and Astronomy.

**Palabras Clave:** IMPACTO AMBIENTAL; AGUAS SUBTERRANEAS; PROTECCION AMBIENTAL; SISTEMAS AMBIENTALES; SALUD HUMANA

### **Desarrollo**

En las últimas décadas se ha manifestado un interés creciente en el examen y la evaluación de los proyectos hidráulicos, no tan sólo en lo que corresponde al aspecto físico del diseño, sino sobre aquellos que tienen implicaciones respecto al sistema ambiental. La razón de ello debe buscarse, ante todo, en la necesidad de establecer un balance adecuado entre los recursos físicos, biológicos y financieros de una región y su población, a fin de alcanzar los objetivos sociales del aprovechamiento hidráulico.

Los métodos para la evaluación de todos los impactos posibles de los proyectos hidráulicos están, aún, en proceso de desarrollo. Los problemas del análisis, interpretación y presentación son inmensamente complejos cuando un proyecto debe ser evaluado para satisfacer varios objetivos y numerosos impactos. En general, los factores a considerar usualmente incluyen temas del desarrollo económico nacional, la calidad ambiental, el desarrollo regional y el impacto social (Antigüedad et al., 1997; Bird et al., 1969; Custodio y Llamas, 1983; Dansgaard, 1964; de Wiest, 1969; Ferris, 1970; Hem, 1970; Kovacs, 1981; Todd, 1970).

Los indicadores hidroambientales son observaciones o mediciones, expresadas en términos cuantitativos, que permiten describir una componente o acción del sistema ambiental. Por su naturaleza pueden ser físicos, químicos, biológicos, sociales o pueden ser reacciones entre los componentes o entre componentes compuestas (Zalewski et al., 1997).

La descripción de un sistema ambiental es un listado de los diferentes indicadores, llamando así, a un grupo selecto de componentes. En este sentido, el indicador es un término que depende estrictamente del observador pero, sin embargo, ello no significa una completa subjetividad por parte de éste, ya que muchas componentes del sistema se cuantifican en ciertas unidades aceptadas universalmente.

Por ello, por ejemplo, existen normas, estándares y regulaciones, que expresan los límites tolerables o admisibles de un cierto componente para el medio o el hombre. En ciertos casos, el estándar puede ser cero, para indicar que un componente particular no debe estar presente, o también puede ser el valor de un cierto indicador con el cual deben compararse otros valores. Los índices relacionan el indicador para un cierto componente con el estándar establecido para él. Expresa, por tanto, cuán deseable o no es tal componente para el hombre y el medio.

El hombre suele ser el componente dominante de muchos sistemas ambientales. En no pocos de ellos, originalmente fue un componente insignificante. Sin embargo, ha logrado penetrar componentes de las que no formaba parte y ha extendido su influencia importando componentes creadas o modificadas por él. En la actualidad, ya sea por su presencia activa o por su influencia, el hombre es parte de la mayoría de los sistemas ambientales.

### **ESTRUCTURA DE LOS SISTEMAS AMBIENTALES**

Los sistemas ambientales se basan, todos, en las interacciones entre los componentes físicos y geológicos. La energía solar, como energía importada, reacciona con las componentes físicas y geomorfológicas de una reacción para crear el clima local, y éste reacciona con los elementos geológicos para formar los materiales básicos que dan lugar al suelo. Por ello, el clima, la morfología y la geología forman el Subsistema Físico Químico básico.

En conjunción con las componentes biológicas, se desarrolla el suelo y éste, con la cubierta vegetal, desarrolla el Subsistema Biológico que incluye, también, las componentes faunísticas. Ambos subsistemas se integran para formar el Subsistema Ecológico.

En tiempos prehistóricos, el hombre fue uno más entre otros componentes faunísticos. Lentamente desarrolló habilidades que le permitieron competir con mayor éxito con otros elementos de la fauna, reemplazarlos y, finalmente, tomar ventaja de los elementos productivos del ecosistema para su propio beneficio. Eso fue logrado mediante el cultivo de plantas alimenticias y domesticando ciertas especies de animales. Al desarrollar las prácticas agrícolas, el hombre encontró necesario sustituir

la vegetación natural por las plantas que deseaba cultivar. Cuando la producción de alimentos sobrepasó las necesidades individuales y se desarrollaron otras habilidades, como el trabajo con los metales o con la madera, y la construcción se tornó más especializada, los alimentos y otros bienes fueron canjeados o comercializados. Se desarrolló así un sistema económico y pronto el medio natural fue objeto de una manipulación y explotación por el hombre, destinada a producir bienestar en forma diferente. Mediante sus nuevas capacidades y, ante sus propios ojos, transformó los subsistemas ecológicos en Subsistemas Económicos. Por ello, la economía es la integración de todos los impactos y las medidas de control del hombre sobre la naturaleza.

El incremento de la población y los hábitos gregarios del hombre, creando comunidades cada vez mayores, lo forzaron a desarrollar medidas de control para las interacciones entre y dentro de los grupos de población. Estas medidas indican el grado de importancia de la situación ecológica, así como la situación económica. Muestran, asimismo, el grado e influencia de las reacciones de retroalimentación desde fuentes sociales o económicas hacia el subsistema ecológico.

Finalmente, el sistema humano, para garantizar su existencia, requiere de un sistema espiritual integrado por muchos componentes para regular las acciones, potenciales y reacciones de la sociedad y la naturaleza, integrada en la cultura mundial. La cultura, así como los requerimientos sociales y las necesidades económicas, deseos y demandas son, en la actualidad, las fuerzas que gobiernan y manipulan los potenciales de producción de la componente biológica o biótica. La explotación de los recursos no puede ser ilimitada y, por ello, no todos los componentes pueden ser utilizados en tanto otros son destruidos o disminuyen sus disponibilidades.

Estas limitaciones conducen a que la manipulación de las componentes tiene que ser controladas dentro de ciertos límites. Así, se establecen reglas para el manejo del entorno encaminadas, ante todo, a regular la utilización de sus componentes. Tales regulaciones son las que conducen, inexorablemente, al concepto de desarrollo sustentable, tan en boga en estos tiempos.

Para evitar confusiones, es bueno destacar que tales regulaciones deben ser válidas para aquellos componentes que, se usen o no, posean un papel importante dentro del sistema. Por ello, deben ser cuantificados respecto a su utilidad y en términos de localizar dónde se produce un cambio directo o indirecto en cantidad, calidad o la dirección del flujo. Y, en cualquier caso, es imprescindible el establecimiento de regulaciones.

Queda claro entonces que para establecer tales regulaciones sobre aquellas componentes que lo permitan, se requiere del uso de indicadores. Identificando éstos y caracterizados cualitativa o cuantitativamente (o ambas), se refieren, como índices, a los estándares, establecidos y constituyen las herramientas idóneas para determinar los impactos del hombre y para monitorear los sistemas. Eso significa que los índices deben suministrar información para el uso económico de los sistemas y las normas, estándares y regulaciones deben establecerse para proteger la naturaleza de la sobreexplotación.

En tal contexto deben evaluarse los proyectos hidráulicos. Y en esta dirección debe avanzarse sostenidamente a fin de desarrollar las metodologías y las tecnologías adecuadas para la evaluación del impacto del uso del agua sobre el medio. Muchos autores han señalado la necesidad de mejorar, sustancialmente, los métodos de evaluación de los proyectos hidráulicos. Los efectos sociales y ambientales pueden ser notablemente amplificados si se toma en consideración que los impactos que

provoca el uso del agua pueden tener consecuencias a largo plazo, colaterales o de retroalimentación.

Se ha recomendado, incluso, que en la evaluación de proyectos de uso del agua se introduzcan índices relativos a la degradación ambiental, pérdida de agua disponible y pérdida del valor potencial del agua. Normalmente, estos no se incluyen y, aún más, ni siquiera suelen ser tomados en la evaluación de tales proyectos.

A las consecuencias antes mencionadas, debe añadirse que la capacidad de resiliencia del sistema, en estrés real o potencial, por la ejecución de obras que implican el uso del agua, hace que la respuesta ambiental resulte sumamente compleja en virtud de:

- La naturaleza probabilística de los efectos.
- La existencia de efectos cumulativos e indirectos.
- La naturaleza dinámica de los efectos ambientales.

Una de las aproximaciones más completas a la evaluación de los impactos ambientales de las obras hidráulicas lo constituyó el resultado del Proyecto A 3.2 de la Segunda Fase del Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO (Card et al., 1984)

## DEFINICION DE INDICADORES HIDROAMBIENTALES

Los indicadores hidroambientales son aquellos componentes del sistema de tipo:

- Físico
- Químico
- Biológico
- Antrópico

Que pueden ser observados y empleados para revelar información sobre el estado del sistema o parte de él, y sobre los cambios en el mismo. La observación de tales indicadores puede, a su vez, realizarse por medios naturales o con equipos e instrumentos científicos empleando factores físicos, químicos, biológicos, así como estándares para la comparación.

Se pretende que tales componentes hidroambientales puedan ser medidas y empleadas para comprender y describir la situación del sistema, de sus potencialidades y de los límites de su uso por el hombre. En consecuencia, algunos de estos indicadores pueden ser seleccionados para cuantificarlos como índices que permitan la conservación y el manejo del recurso.

Los indicadores son de los siguientes tipos:

- Físico-geográficos
- Hidrológicos
- Físico-químicos
- Biológicos
- Socioeconómicos
- Nutricionales y de salud
- Culturales
- Indicadores físico-geográficos

Se trata de indicadores que describen la situación geomorfológica y las condiciones climáticas, así como los resultados de la interacción entre las componentes de los sistemas físico-geológicos, morfológicos y humanos. Tales indicadores son:

- Climáticos

- Geológicos
- Edáficos
- de Comunidades Vegetales
- de Geografía humana y económica
- Geomorfológicos

Los elementos que lo integran se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Indicadores físico geográficos

Indicadores	Componentes
Geomorfológicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altitud</li> <li>• Pendiente</li> <li>• Red fluvial</li> <li>• Erosión y sedimentación</li> <li>• Glaciación</li> </ul>
Climáticos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Radiación</li> <li>• Temperatura del aire y respuesta diurna mensual y estacional</li> <li>• Balance de energía</li> <li>• Precipitación</li> <li>• Evaporación</li> <li>• Humedad del aire</li> <li>• Viento (velocidad y dirección)</li> </ul>
Geológicos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sustrato geológico</li> <li>• Minerales útiles</li> <li>• Litología y tectónica</li> <li>• Sismicidad</li> </ul>
Edáficos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipos de suelos, variedades y series</li> <li>• Erodabilidad</li> <li>• Compacidad</li> <li>• Permeabilidad</li> <li>• pH y composición físico-química</li> <li>• Coeficientes de campo y de marchitez</li> </ul>
Indicadores de comunidades vegetales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cobertura relativa de comunidades vegetales significativas</li> <li>• Evapotranspiración</li> <li>• Representatividad</li> </ul>
Geografía humana y económica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Red vial</li> <li>• Uso de la tierra: agrícola, asentamientos, minería o potencial minero, industria, energía hidráulica (o potencial hidráulico)</li> </ul>

### Indicadores hidrológicos

Estos indicadores describen la cantidad de agua, tipos de agua, comportamiento de los tipos de agua y el carácter físico del agua y de las conducciones. Son los siguientes (Tabla 2):

- Precipitaciones.
- Escurrimiento.
- Configuración del lecho fluvial.
- Relación lecho-plano de inundación.
- Flujo superficial.

- Condiciones en los estuarios.
- Lagos naturales y estanques.
- Embalses y obras de regulación.
- Acuíferos.

Tabla 2. Indicadores hidrológicos

Indicadores	Componentes
Precipitaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nieve y almacenamiento glaciario</li> <li>• Lluvia</li> <li>• Escurrimiento superficial (incluyendo el almacenamiento en lagos)</li> <li>• Evaporación</li> <li>• Transpiración</li> <li>• Almacenamiento subterráneo</li> </ul>
Escurrimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descarga hiperanual.</li> <li>• Fluctuaciones, almacenamiento, descarga y frecuencia del escurrimiento anual.</li> <li>• Características del régimen en aguas altas.</li> <li>• Características de las avenidas.</li> <li>• Características de los caudales bajos.</li> </ul>
Configuración del lecho fluvial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Morfometría de las secciones.</li> <li>• Sedimentos suspendidos y del fondo (propiedades físicas, químicas y su granulometría).</li> <li>• Pendiente longitudinal y perfil de equilibrio.</li> </ul>
Relación lecho-plano de inundación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existencia de aguas en el plano de inundación.</li> <li>• Frecuencia de inundaciones y duración de las mismas.</li> </ul>
Características del flujo superficial	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condiciones de formación del flujo.</li> <li>• Líneas de flujo.</li> <li>• Perfiles longitudinales de los ríos.</li> <li>• Transporte de sedimentos.</li> <li>• Carga química y orgánica.</li> </ul>
Condiciones en los estuarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Intrusión marina.</li> <li>• Deriva litoral.</li> <li>• Deposición de sedimentos.</li> </ul>
Lagos naturales y estanques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Morfologías: área, profundidad, exposición al viento, tipos de bancos.</li> <li>• Balance hídrico.</li> </ul>
Embalses y obras de regulación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Objetivos.</li> <li>• Caudales de entrega y volumen de almacenamiento.</li> <li>• Balance hídrico.</li> <li>• Propiedades físico-químicas de las aguas.</li> <li>• Azolvamiento.</li> <li>• Zonación vertical.</li> <li>• Relación con los acuíferos.</li> </ul>
Características de los acuíferos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Constitución geológica y acuosidad de las diferentes unidades tectonofaciales.</li> <li>• Expresión morfológica de las unidades hidrogeológicas.</li> <li>• Régimen de las aguas subterráneas.</li> <li>• Condiciones de flujo y organización del</li> </ul>

- escurrimiento subterráneo.
- Espesor de la zona no saturada.
- Sistemas de flujo.

### Indicadores físico-químicos

Estos indicadores deben proveer información sobre los aspectos de calidad de las aguas y de su potencial para cambiar sus características físicas y químicas como consecuencia de reacciones entre las componentes físicas, químicas, biológicas y, en cierto grado, con las componentes antrópicas.

#### Las componentes físicas son:

- Escorrentía superficial: carácter del flujo, transporte de sedimentos, sedimentación y erosión.
- Aguas en estanques: influjo, energía lumínica, transparencia, absorción de luz, transformación de luz en calor, zonación vertical, variación de la temperatura en los estratos, turnover, características de las mezclas, sedimentación.
- Lagos y embalses: estratificación térmica y química debida a las diferencias entre las aguas que ingresan y las almacenadas.
- Aguas subterráneas: variaciones interanuales de temperatura, conductividad eléctrica y salinidad

#### Las componentes químicas son:

- Sólidos Disueltos Totales
- Sólidos Suspendidos Totales
- Carbono Orgánico Total (TOC)
- pH
- REDOX
- Conductividad Eléctrica de las Aguas (SPC)
- Gases totales disueltos
- Salinidad total
- Alcalinidad y acidez
- Dureza
- Capacidad de buffering
- Oxígeno disuelto (OD)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
- Materia orgánica disuelta
- Macroconstituyentes
- Nutrientes (ciclos del N y del P)
- Metales pesados y microelementos
- Componentes orgánicos específicos (proteínas, grasas, carbohidratos, pesticidas, petroquímicos, detergentes)
- Radioactividad

### Indicadores biológicos

La situación biológica presente en un medio es la expresión viviente de la cantidad, calidad e interacciones entre los componentes físicos, hidrológicos y químicos, de un lado y su reacción con los componentes biológicos de otro.

La presencia o ausencia de organismos indicadores y el comportamiento de la componente biológica suministran información, también, sobre el fondo físico-químico del sistema. Por ello, muchos impactos se expresan en los indicadores biológicos. Estos indicadores se expresan (Tabla 3):

- En el área de la cuenca.



- En las aguas de escurrimiento.
- En lagos naturales, lagunas y embalses.
- En las aguas subterráneas.

Tabla 3. Indicadores biológicos

Indicadores	Componentes
Componentes biológicos en el área de la cuenca	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Tipo de comunidad vegetal y perturbaciones.</li> <li>· Estado trófico (producción de biomasa y turnover)</li> <li>· Ciclo de nutrientes.</li> <li>· Capacidad de intercambio catiónico de los suelos</li> </ul>
Componentes biológicos en aguas de escurrimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Importación de nutrientes mediante las aguas subterráneas.</li> <li>· Potencial trófico y producción real a lo largo de los cursos de agua.</li> <li>· Cultivos.</li> <li>· Composición de la fauna de fondo y la flora a lo largo de los cursos de agua.</li> <li>· Vectores de enfermedades.</li> <li>· Organismos indicadores de contaminantes orgánicos e inorgánicos, contaminación y grado de autodepuración.</li> <li>· Población de peces y diversidad.</li> <li>· Perfil de O<sub>2</sub> y DBO.</li> </ul>
Componentes en lagos naturales, lagunas y embalses	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Producción primaria y potencial</li> <li>· Diversidad de flora y fauna en las zonas trofogénicas.</li> <li>· Diversidad de la flora y fauna en las zonas trofolíticas.</li> <li>· Componentes químicos como el P y el N y su variación estacional en los diferentes estratos.</li> <li>· Organismos específicos</li> </ul>
Indicadores para las aguas subterráneas	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Contaminación fecal ( E. coli )</li> <li>· Producción de biomasa</li> <li>· Componentes químicos como el P y el N y su variación estacional en los diferentes estratos.</li> <li>· Componentes químicos que indican contaminación xenobiótica</li> </ul>

### Indicadores socioeconómicos

Los componentes humanos de un sistema son el resultado del uso del potencial ecológico. Tales componentes (Tabla 4) ofrecen información sobre:

- La presión del hombre sobre la naturaleza.
- El grado de éxito alcanzado en la transformación de los recursos naturales en bienes de consumo y en valores necesarios para operar los subsistemas económicos y sociales.
- El grado de éxito alcanzado por la sociedad y los individuos en la nutrición y en la salud.
- El grado de éxito en la realización de las ambiciones culturales de la sociedad y los individuos.



Tabla 4. Indicadores socioeconómicos

Indicadores	Componentes
Presión sobre el entorno	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Densidad de población</li> <li>· Requerimientos económicos: estándar de vida deseado o PNB deseado</li> </ul>
Nivel de éxito	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Estructura de la población (distribución por edades).</li> <li>· Diversidad vocacional.</li> <li>· Ingreso familiar.</li> <li>· Tamaño de la familia.</li> <li>· Fuentes de ingreso.</li> <li>· Razones y diversidad de los gastos</li> <li>· Ahorros.</li> <li>· PNB real por hombre (o familia).</li> <li>· Producción agrícola por unidad de área para cultivos selectos.</li> </ul>
Indicadores socioeconómicos complementarios	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Consumo de energía por persona y por año.</li> <li>· Políticas de tenencia de la tierra.</li> <li>· Riego.</li> <li>· Urbanización.</li> <li>· Actividades laborales y capacidad de trabajo.</li> <li>· Facilidades recreacionales.</li> </ul>

#### Indicadores de salud y nutrición

Las medidas técnicas que se adoptan en los ambientes humanos se destinan a mejorar las condiciones de vida de la población y deben resultar en una calidad de vida superior. Disponer de suficiente agua y comida es uno de los medios para alcanzar este propósito y, en combinación con otras medidas preventivas y de salud garantizan el incremento de la esperanza de vida de las personas.

Las componentes de atención a la salud, los peligros sobre ésta y la nutrición revelan en qué medida la presión tecnológica del hombre sobre el medio ha sido exitosa para lograr una población sana en un medio saludable. Los indicadores de salud y nutrición son (Tabla 5):

- Situación general de la salud.
- Grado de atención a la salud.
- Higiene pública.

Tabla 5. Indicadores de salud y nutrición

Indicadores	Componentes
Situación general de la salud	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Tasa de nacimiento.</li> <li>· Tasa de mortalidad.</li> <li>· Mortalidad infantil.</li> <li>· Esperanza media de vida.</li> <li>· Distribución de la población por edades.</li> <li>· Crecimiento de la población.</li> <li>· Densidad de población.</li> </ul>
Grado de atención a la salud	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Médicos por habitante.</li> <li>· Camas en hospital/población</li> </ul>
Higiene pública	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Condiciones de la vivienda.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seguridad del abastecimiento de agua.</li> <li>• Disposición de los desechos humanos.</li> <li>• Grado de vacunación.</li> <li>• Enfermedades de la piel.</li> <li>• Parasitismo intestinal.</li> <li>• Parasitismo pulmonar y de la piel.</li> </ul>
Indicadores específicos de la situación de la salud:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % de infecciones pulmonares y respiratorias.</li> <li>• % de infecciones intestinales respecto a otras enfermedades.</li> <li>• Tasa de mortalidad debida a enfermedades pulmonares, respiratorias e intestinales.</li> </ul>
Indicadores específicos de peligros potenciales para la salud:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Distribución de parásitos intestinales, en la sangre y en la piel.</li> <li>• Presencia de vectores de parásitos en el sistema.</li> <li>• Presencia de parásitos y enfermedades en los sistemas vecinos.</li> </ul>
Indicadores del estado nutricional:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calorías disponibles per cápita.</li> <li>• Proteínas disponibles per cápita (incluye la proteína animal).</li> <li>• Consumo de vitamina A.</li> <li>• Consumo de vitamina C.</li> <li>• Consumo de Riboflavina.</li> <li>• Relación altura/peso corporal en la población preescolar.</li> <li>• Anemia.</li> </ul>

### Indicadores culturales

Originalmente, las prácticas culturales han sido herramientas para el mejor manejo del entorno humano y para la solución de conflictos. Ciertamente, el desarrollo socioeconómico ha motivado que muchas de estas prácticas hayan perdido su importancia y otras su sentido o su significado. Sin embargo, muchas de ellas aún están presentes y cambiarlas rápidamente o no tomarlas en consideración puede producir una fuerte retroalimentación negativa en el desarrollo del sistema. Los indicadores culturales son

(Tabla 6) del tipo siguiente:

- De importancia social.
- De importancia social y cultural.
- De importancia cultural y ecológica.

Tabla 6. Indicadores culturales

Indicadores	Componentes
De importancia social	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Background étnico.</li> <li>• Organización de la estructura familiar (derechos de la madre y del padre).</li> <li>• Prácticas de la propiedad de la tierra.</li> <li>• Distribución del trabajo y la oportunidad entre sexos.</li> <li>• Organización de las políticas tribales y de grupos sociales.</li> <li>• Herencia laboral.</li> </ul>
De importancia socio-cultural	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Totemismo.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"><li>• Tabúes.</li><li>• Prácticas religiosas y creencias especiales.</li><li>• Existencia de terrenos sagrados.</li><li>• Sitios arqueológicos.</li></ul>
De importancia cultural y ecológica	<ul style="list-style-type: none"><li>• Terrenos sagrados.</li><li>• Reservas de vida salvaje.</li><li>• Potenciales para el establecimiento de reservas especiales.</li></ul>
De importancia cultural y socioeconómica	<ul style="list-style-type: none"><li>• Sistemas educacionales.</li><li>• Alfabetismo.</li></ul>

### Indices hidroambientales

Los índices son los límites cuantitativos de los indicadores. En tal contexto, la cuantificación normalmente significa, pero no está restringida, a una cierta cantidad o concentración que puede ser el valor del límite máximo o mínimo permitido. No olvidar tampoco que “sí” o “no” pueden, también, representar una cuantificación.

Los índices que conciernen a la acción del hombre sobre el entorno se restringen, fundamentalmente, al uso del medio o de los componentes ambientales. Como ejemplo pueden citarse las normas de agua potable en diferentes países o los estándares para el uso de las aguas superficiales en el abastecimiento, o para el riego, en los cuales los índices se expresan en los rangos de ciertos elementos químicos, la salinidad total o la concentración permitida de E. Coli.

En otro contexto, los índices son utilizados para la nutrición y ofrecen información sobre, por ejemplo, cuántas calorías per cápita por día se requieren para diferentes actividades ocupacionales y la cantidad necesaria de incorporación de vitaminas y elementos traza.

Tales índices intentan constituir medidas de protección al hombre o proteger las fuentes directas de alimentación y agua. Aún no existen índices para la protección de la naturaleza a largo plazo pero, en su conjunto, los índices que se relacionan en este epígrafe desempeñan un papel importante en los sistemas naturales aún cuando, en la actualidad, estén lejos de poder ser cuantificados.

Como quiera, la aplicación de estos índices ofrece una idea muy precisa del desarrollo de un sistema natural, de las afectaciones que se prevén o han ocurrido, o de los impactos potenciales sobre ellos.

Los índices hidroambientales son, por tanto, los siguientes:

- Indices de Recursos.
- Indices Ecológicos.
- Indices Sociales, económicos y culturales.

### Índices de Recursos

Aquí el término “recurso” indica que el énfasis principal se pone en el uso potencial del sistema o de un componente del sistema por el hombre. Por ello, el índice recurso muestra el cambio del potencial del sistema o de sus componentes.

En este caso, los índices que se desarrollan deben establecerse con el propósito de proteger la vida humana, fundamentalmente la salud y proteger el potencial útil del recurso o del recurso componente. Por ello, el asunto concierne al medio ambiente o a sus componentes, como las hidrológicas, que están estrechamente administradas y

sometidas a prácticas ingenieras por el hombre.

Entre ellos, deben destacarse los recursos que se dedican:

- Para el abastecimiento de agua potable e industrial.
- Para la alimentación y la producción de alimentos.
- Para la producción de energía.
- Para la explotación minera.
- Para la recreación.

Los índices que cubren los recursos para el abastecimiento de agua son:

- Nivel de fondo (Background) hidrológico.
- Nivel de fondo (Background) químico natural.
- Contaminación o potencial de contaminación derivado del alcantarillado, desechos industriales o la atmósfera.

Las fuentes de abastecimiento de agua (superficiales y subterráneas) deben satisfacer un cierto número de requerimientos de calidad. En tal sentido, por ejemplo, no debe presentar ciertas sustancias químicas por debajo o sobre ciertas concentraciones críticas en dependencia de si el agua será usada sin tratamiento o con tratamiento. Aún cuando el resto de los requerimientos se satisfagan, el potencial de contaminación no suele estar definido.

Para tales propósitos, por ejemplo, existen normativas que establecen los requerimientos de las aguas de alcantarillado antes de ser vertidas a cuerpos de agua natural.

Tratadas o no, las destinadas al abastecimiento deben estar libres de parásitos intestinales o patógenos, de sustancias orgánicas tóxicas o degradables, deben contener ciertas concentraciones de algunos elementos traza, como el flúor, o no deben exceder ciertos límites para otros elementos.

Aquellas que se destinan al abastecimiento industrial requieren, según el caso, cumplimentar otras propiedades.

Las que, sin embargo, deban ser utilizadas con fines de riego o para la ganadería, tienen también que satisfacer no pocos requerimientos según el tipo de cultivo, como son la salinidad o la concentración de determinados metales.

Las fuentes que se destinan al suministro de procesadoras de alimentos son especialmente importantes. En los países industrializados, el mayor potencial en la contaminación de alimentos proviene de la contaminación del suelo con metales pesados derivados de desechos municipales, o en áreas agrícolas a lo largo de carreteras, donde suelen contaminarse con plomo.

### Índices Ecológicos

Los índices ecológicos realmente no existen, pero deben considerar tanto la componente abiótica (hidrológico, climático, físico y químico) como la componente biótica.

Entre las componentes abióticas, las siguientes:

- Cantidad y calidad del escurrimiento superficial.
- Cantidad y calidad del escurrimiento subterráneo.

- Volúmenes de explotación de los recursos hídricos.
- Variación anual de las reservas.
- Variación anual e hiperanual de la evaporación, temperatura del aire y la velocidad del viento.
- Variaciones en la estratificación de la temperatura del aire y del agua en embalses y lagos.
- Cambios en la composición química y calidad de las aguas superficiales y subterráneas.

Entre las componentes bióticas se destacan:

- Uso de la tierra y del agua.
- Estructura de las comunidades animales y vegetales.
- Estructura de la cadena alimentaria.
- Metabolismo del sistema.
- Vulnerabilidad de los ecosistemas.
- Efectos tóxicos de las componentes en el sistema.
- Saprobididad.
- Estado trófico.

### Índices sociales, económicos y culturales.

Los esfuerzos del hombre por transformar la naturaleza se orientan hacia el objetivo básico de mejorar la situación social, económica y cultural de la población en un determinado medio ambiente.

Por ello, todos los cambios producidos o inducidos por el hombre deben medirse y cuantificarse respecto a tales objetivos, sin desconsiderar el efecto complementario del tiempo. En la evaluación de la situación, así como en el desarrollo e implementación de los índices correspondientes, no debe perderse de vista que los beneficios deben alcanzar no sólo la generación actual, sino a las futuras. Tiene la misma importancia, por ejemplo, para las siguientes dos generaciones.

Los índices socioeconómicos y culturales pueden agruparse en (Tabla 7):

- Índices de salud y nutrición
- Índices de la situación económica
- Índices socio-culturales

Tabla 7. Índices sociales, económicos y culturales

Indicadores	Componentes
Índices de salud y nutrición	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Disponibilidad de médicos e instalaciones hospitalarias</li> <li>• Mortalidad infantil</li> <li>• Componentes nutricionales (índices ajustados localmente para el suministro de proteínas, deficiencia de vitaminas y relación entre el ingreso total de calorías y la demanda de ellas)</li> <li>• Condiciones de la vivienda (ajustadas localmente)</li> </ul>
Índices de la situación económica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suministro de energía</li> <li>• Tenencia de la tierra</li> <li>• PNB total y PNB por persona o por unidad de terreno</li> <li>• Relación entre el PNB derivado de la agricultura y</li> </ul>

	el que resulta de la industria · Vialidad e infraestructura para transportación/movilización (kilómetros de carreteras o caminos por km <sup>2</sup> de tierra)
Indices socioculturales	· Analfabetismo · Diversidad de la enseñanza superior

Las componentes y los efectos ambientales que se esconden detrás de estos índices se traducen, al final, cumulativamente, en dos índices de rango superior, a saber, el Índice de Harvard o cualquier otro que se seleccione para describir el estado nutricional y de salud de la infancia, y la esperanza media de vida. Como señalan Card y sus colaboradores, "si los impactos del hombre en un determinado medio ambiente son ambientalmente positivos, la esperanza media de vida crecerá y se mostrará en la generación viviente, y la salud y estado nutricional de la niñez preescolar revelará tal efecto en la generación por venir".

Es importante destacar (OMM, 1996) que la seguridad alimentaria es el problema más importante en la mayoría de los países con bajo per cápita de producción de alimentos y elevada dependencia de la agricultura. En el mundo subdesarrollado, el abastecimiento alimenticio está por debajo de las 2100 calorías por día por persona, para aproximadamente 1,91 miles de millones de personas, mientras que en los países desarrollados ello alcanza 3300 calorías por día por persona. Más de 800 millones de personas en el mundo están subalimentadas.

Tomando en cuenta que el 88% del incremento de la población mundial en las últimas tres décadas ha tenido lugar en los países en vías de desarrollo, que constituyen el 77% de la población mundial, la seguridad alimentaria es materia de prioridad política en tales países. Sin embargo, existen factores climáticos e hidrológicos de consideración en el planeamiento del suministro y producción de alimentos.

La seguridad alimentaria involucra al clima como un recurso natural. Las plantas y animales responden a elementos climáticos como a las temperaturas del aire y el suelo, precipitaciones, humedad atmosférica y del suelo, el viento, la radiación solar y la insolación.

La temperatura óptima de un cultivo particular puede ser un factor limitante para otro, ya sea que resulte muy alta o muy baja, en dependencia de la fisiología o la fenología del cultivo y, en última instancia, de la productividad del mismo.

Los requerimientos climáticos también pueden ser diferentes de una región a otra, de acuerdo con la variabilidad de cierto parámetro climático particular, y en correspondencia con la interacción entre la planta y/o el ganado y el medio ambiente de una región particular.

El cambio climático y su variabilidad, las sequías e inundaciones ejercen una influencia directa sobre la producción agrícola y, muchas veces, de modo adverso, particularmente en los países en vías de desarrollo donde no se dispone de medios tecnológicos para contrarrestar los efectos negativos de la variación de las condiciones ambientales.

## MATRICES DE EVALUACION DE IMPACTOS SOBRE EL REGIMEN Y LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRANEAS

El régimen y la calidad de las aguas subterráneas pueden ser impactados como consecuencia del uso de la tierra y del agua (Andrieux, 1970; Araguás y Gonfiantini, 1992; Arellano, Molerio y Santos, 1993; Back y Plummer, 1977; Back et al., 1979; Cabral et al., 1992; Clayton et al., 1966; Díaz y Febrillet, 1986; Febrillet et al., 1989; Gutiérrez, Molerio y Bustamante, 1997; Lerman, 1970; Lesser, 1976; Molerio, 1990, 1992a, 1992b, 1992c, 1994; Molerio et al., 1993, 1996, 1997; Sugawara, 1967; Yera y Molerio, 1997).

Sin embargo, no siempre ambas componentes del sistema de flujo son afectadas. Del mismo modo, en la práctica es útil distinguir aquellos efectos que se producen sobre el régimen de los que se ejercen sobre la composición química y, en última instancia sobre la calidad de las aguas subterráneas. Ello se debe, en particular, al hecho de que la amplificación de los efectos es diferente ya que los cambios se expresan en distintas unidades de tiempo y se propagan de forma diferente sobre el acuífero.

Cualquier sistema comprende un conjunto de componentes físicos y geométricos, un grupo de acciones exteriores al sistema, y unas leyes de funcionamiento. Para los propósitos de simulación es necesario describir cuantitativamente, además, el dominio de influencia, las condiciones iniciales, y las condiciones en los límites (Barends, 1978; Bear, Zaslavsky e Irmay, 1968; Biot, 1941; Bredov et al., 1986; Mangiun, 1982; Molerio, 1985; Myers, 1966; Taylor y Cary, 1964; Wallick y Tóth, 1976) .

El modelo conceptual ya fue resumido al tratar la definición del sistema. Conviene detenerse en la concepción general de las leyes de su funcionamiento.

Las relaciones causa-efecto en el carso no son obvias. Cuando un cierto estímulo (E) llega al sistema, le suministra un determinado valor adicional de energía (ESS).

En dependencia del estado inicial del sistema (EIS), lo que en otros términos significa el nivel de energía interna que posee en ese instante, éste responderá con cierta inercia, asimilando y transformando tal estímulo y entregando un cierto valor de energía liberada (ELS). Debido al carácter probabilístico de la entropía, de acuerdo con el balance termodinámico que tenga lugar, ocurrirá o no un cambio hacia un nuevo estado inicial dentro de la tendencia general del sistema a moverse hacia niveles de incremento de entropía (de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica).

La modulación de las respuestas del sistema, es decir, su inercia ante el estímulo, es una de las fuentes de estocacidad del movimiento. Asimismo, indica que cualquier transformación no ocurre linealmente y, del mismo modo, que los cambios hacia nuevos EIS son irreversibles. Ello no niega la existencia de algunos ciclos cerrados en el sistema, sino que, por el contrario, éstos afirman la fuerte influencia, en el movimiento, de la componente de tendencia (Carnahan, 1976; Case y Welch, 1979; Kennedy y Lielmsz, 1973; Molerio, 1985, Terlietsky, 1975).

Las transformaciones de energía que tienen lugar, por lo general, ocurren sin aproximación al equilibrio térmico. Las formas de relieve constituyen una clara manifestación de la parte de energía ESS que se invierte en trabajo, de manera que los efectos medidos a la salida del sistema no son más que niveles de energía remanentes de la energía disipada durante el proceso de asimilación y transformación del estímulo. Tal inversión de energía es la causante del mecanismo de retroalimentación que tiene lugar en el carso y que afecta cada nuevo proceso.



De este modo se deducen cualitativamente tres características fundamentales de las leyes que rigen el funcionamiento del sistema:

- 1/ las transformaciones no son lineales;
- 2/ los procesos son irreversibles, y
- 3/ el sistema se retroalimenta.

Una buena aproximación a la representación de la realidad se logra aplicando técnicas de control de sistemas no lineales con retroalimentación, discriminando adecuadamente las no linealidades, ya sean analíticas o no.

Uno de los problemas más importantes que se confrontan en el diseño de tales sistemas y, en general, en la correcta apreciación del comportamiento del caso se deben, precisamente, a la invalidación del principio de superposición, ya que la relación causa-efecto (input-output) deja de ser directamente proporcional. Ello equivale a decir que la forma de la respuesta transitoria a los estímulos escalonados no puede encontrarse en la sumatoria de las respuestas a estímulos escalonados o a entradas oscilatorias o con pulsaciones. Por tal razón, las componentes no lineales no poseen una función única de transferencia.

Sin embargo, quizás uno de los problemas más serios que resultan de la inaplicabilidad del principio de superposición es el que concierne a la supresión de la relación formal entre el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia en los sistemas no lineales, lo que implica que no parece posible calcular la respuesta en tiempo a partir de la respuesta en frecuencia o viceversa. Esto tiene una importante consecuencia en cuanto a las posibilidades de predicción del comportamiento del sistema, lo cual está estrechamente vinculado a sus condiciones de estabilidad.

Es interesante que los sistemas no lineales pueden ser completamente estables o totalmente inestables y además, pueden presentar oscilaciones sostenidas de amplitud finita, es decir, ciclos cerrados o límite, cuya existencia depende del tipo, magnitud y modo de aplicación al sistema de la función de forcing. Por ello, los elementos del régimen de las aguas subterráneas, circunscribiendo el análisis a los efectos sobre la física del sistema, que suelen ser afectados, son los siguientes:

- Recarga
- Sobreexplotación
- Salinización del acuífero
- Salinización del suelo
- Avance de la intrusión marina
- Reservas
- Recursos de explotación
- Evaporación
- Evapotranspiración
- Escurrimiento superficial
- Gradiente hidráulico
- Dirección del flujo
- Percolación
- Mezcla de horizontes acuíferos
- Mezcla de aguas superficiales y subterráneas
- Velocidad de flujo
- Tiempo de tránsito (renovación)
- Relleno de grietas
- Propiedades físicas del acuífero

En cuanto concierne a la composición química y la calidad de las aguas subterráneas, los siguientes elementos son los que se afectan con mayor frecuencia:

- Metales pesados tóxicos
- Macroconstituyentes tóxicos
- pH
- T°C
- Sólidos en suspensión
- Materia flotante
- Adsorción + intercambio iónico
- Grasas y aceites
- Conductividad Eléctrica Específica (SPC)
- Sólidos sedimentables totales
- Hidrocarburos y fenoles
- Nutrientes Nitrogenados
- Nutrientes fosfatados
- Mineralización
- Atenuación natural
- Relación de Absorción de Sodio (SAR)
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- Coliformes
- Biodiversidad subterránea
- Radioactividad

Sin embargo, en tanto sistema en movimiento, la identificación y evaluación de los impactos sobre las aguas subterráneas quedarían incompletos si los efectos (favorables o no) no se categorizan a escala temporal. Para ello es conveniente manejar las siguientes alternativas:

- Impacto favorable a corto plazo
- Impacto desfavorable o no deseado a corto plazo
- Impacto favorable a mediano plazo
- Impacto desfavorable o no deseado a mediano plazo
- Impacto favorable a largo plazo
- Impacto desfavorable o no deseado a largo plazo
- Persistente a corto plazo
- Persistente a mediano plazo
- Persistente a largo plazo
- No influye

La Tabla 8 muestra la simbología adecuada para el trabajo con las matrices.

Tabla 8. Simbología para las matrices de evaluación de impactos sobre el régimen y la calidad de las aguas subterráneas

Dominio Espacial Símbolos	Significado
+	Incremento en los límites de la norma
>	Incremento superior a la norma
-	Decremento en los límites de la norma
<	Decremento inferior a la norma
=	Sin variación pero dentro de los límites de la norma

	Sin variación pero por encima de los límites de la norma
	Sin variación pero por debajo de los límites de la norma
?	Falta información para la evaluación
	No requiere ser evaluado

<b>Dominio Temporal Símbolos</b>	<b>Significado</b>
C+	Impacto favorable a corto plazo
C-	Impacto desfavorable o no deseado a corto plazo
M+	Impacto favorable a mediano plazo
M-	Impacto desfavorable o no deseado a mediano plazo
L+	Impacto favorable a largo plazo
L-	Impacto desfavorable o no deseado a largo plazo
PC	Persistente a corto plazo
PM	Persistente a mediano plazo
PL	Persistente a largo plazo
NI	No influye

Las acciones de uso de la tierra y el agua que más comúnmente influyen sobre el régimen y la calidad de las aguas subterráneas son las siguientes:

- Construcción de Edificios
- Demolición de Edificios
- Pavimentación de Carreteras
- Terraplenes
- Puentes
- Presas
- Canales
- Trincheras
- Pozos abasto
- Pozos recarga
- Explotación de canteras y minas a cielo abierto
- Explotación de minas subterráneas
- Rellenos sanitarios
- Lagunas de oxidación
- Riego
- Drenaje
- Deforestación
- Reforestación

- Cementerios
- Exploración de petróleo
- Explotación de petróleo
- Fertilización
- Almacenamiento de combustible
- Almacenamiento de sustancias tóxicas
- Rectificación de ríos
- Descarga de efluentes
- Inyección de residuales

Adicionalmente debe destacarse que, en el examen de los impactos sobre las aguas subterráneas es necesario manejar los términos de atenuación natural, en tanto los acuíferos exhiben diferente capacidad de autodepuración, saturación residual o retención de contaminantes, en dependencia de sus indicadores de vulnerabilidad intrínseca (Molerio, Flores y Menéndez, 1997)

### **Bibliografía:**

Andrieux, Claude (1970): Contribution a l'etude du climat des cavites naturelles des massifs karstiques. III/ Evapo- condensation souterraine. Ann. Speleol. 25(3):91-119

Antigüedad. I.; M. Arellano; M.L. Calvache; M.V. Esteller; J.R. Fagundo; M.A. Gómez; A. González; A. González; J. Gutiérrez; H. Llanusa; M. López; L.F. Molerio; T. Morales; I. Morell; I. Mugerza & A. Pulido (1997): Curso Avanzado sobre Contaminación de Aguas Subterráneas. Monitoreo, Evaluación, Recuperación. 2 vols., Castellón, 324:

Araguás Araguás, L.; R. Gonfiantini (1992): Los isótopos ambientales en los estudios de la intrusión marina. IAEA, Viena, 60:

Arellano, D.M.; L.F. Molerio León & A. Santos Sanamé (1993): Dinámica del Flujo Regional en el Macizo Metamórfico de la Isla de la Juventud. in/ Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 1994, IAEA TECDOC-835, Viena, :175-194

Back, W.; L. Neil Plummer (1977): Comparison of mass transfer involving carbonate reactions in three limestone aquifer systems. U. S. Geol. Surv., Virginia:174-181

Back, W.; B. B. Hanshaw; T. E. Pyle; L. N. Plummer; A. E. Weidie (1979): Geochemical significance of groundwater discharge and carbonate solution to the formation of Caleta Xel Ha, Quintana Roo, Mexico.

Barends, F. B. J. (1978): Advanced methods in groundwater flow computation. Delft Soil Mech. Lab., Netherlands (4), 150:

- Bear, J.; D. Zaslavsky y E. Irmay (1968): Physical principles of water percolation and seepage. Unesco. Arid Zone Res. XXIX, Paris, 465:
- Biot, M. A. (1941): General theory of three dimensional consolidation. J. Appl. Phys. (12):155-164
- Bird, R. Byron; Warren E. Stewart y Edwin N. Lightfoot (1969): Transport phenomena. Edit. Revolucionaria, La Habana, 780:
- Bredov, M. et al. (1986): Electrodinámica clásica. Edit. Mir, Moscú, 492:
- Brown, Frederick C. (1970): Física de los sólidos. Cristales iónicos, vibraciones en las redes e imperfecciones. Edit. reverté, Barcelona, 448:
- Cabral, J. M. P.; P. M. Carreira; M. C. Vieira; J. braga dos Santos; M. J. Leitao de Freitas; R. Gonfiantini (1992): Study of groundwater salinization in Algarve, Portugal, using environmental isotope techniques. IAEA, Viena, 5:
- Carnahan, C. L. (1976): Non-equilibrium thermodynamics of groundwater flow systems: Symmetry properties of phenomenological coefficients and considerations of hydrodynamic dispersion. Jour.Hydrol 31:125-150
- Case, C.M. y A. Welch (1979): Pore size distribution, suction and hysteresis in unsaturated groundwater flow. in/ W.Back y D.A. Stephenson (guest editors): Contemporary hydrogeology. The George Burke Maxey Memorial Volume. Jour.Hydrol. 43:99-120
- Clayton, R. N.; I. Friedman; D. L. Graf; T. K. Mayeda; W. F. Meents; N. F. Shimp (1966): The origin of saline formation waters. 1. Isotopic composition. J. Geophys. Res. 71(6):3869-3882
- Custodio, E. y M. R. Llamas (1983): Hidrología subterránea. Edic. Omega, Barcelona, Tomo I, 1157:
- Dansgaard, W. (1964): Stable Isotopes in Precipitation. Telus (16):436-468
- de Wiest, R. J. M. (1969): Flow through porous media. Academic Press, 530:
- Díaz Arenas, A. A. y J. Febrillet (1986): Hydrology and water balance of small islands. A review of existing knowledge. Tech. Doc. Hydrol. Unesco, París, 25:
- Febrillet, J. F.; E. Bueno; K. P. Seiler; W. Stichler (1989): Estudios isotópicos e hidrogeológicos en la región suroeste de la República Dominicana. Doc.Téc. Estudios de Hidrol. Isotópica en Amér. Lat., OIEA, Viena, :273-289
- Ferris, J. G. (1970): Teoría de los acuíferos. Inst. Cub. Libro, La Habana, 127:
- Gutiérrez Díaz, J. ; L.F. Molerio & C.M. Bustamante Allen (1997): Modelo Matemático para el Cálculo de

Nitrato en Acuíferos Cársicos sometidos a Prácticas Agrícolas Intensivas. III Congr. Internac. AIDIS, Puerto Rico. Publicado en CD.

Hem, J. (1970): Studying and interpretation of the chemical characteristics of natural water. Geol. Surv. Water Supply Paper 1473, 363:

Kennedy, G.F. y J. Lielmsz (1973): Heat and mass transfer of freezing water-soil systems. Water Resourc.Res. 9(2):395-400

Kovacs, G. (1981): Seepage hydraulics. Ak.Kiado, Budapest, 730:

Lerman, A. (1970): Chemical equilibria and evolution of chloride brines. Mineralog. Soc. Amer. Spec. Paper 3:291-306

Lesser Illades, J. M. (1976): Estudio hidrogeológico e hidrogeoquímico de la Península de Yucatán. Secr. Rec. Hidr., México, 62:

Mangin, A. (1982): Mise en evidence de l'originalite et de la diversite des aquiferes karstiques. Ann.Sci.Univ.Besancon, Trois. Coll. Hydrogeol. Pays Calcaire :159-172

Mackenzie, F. T.; R. M. Garrels (1966): Chemical mass balance between rivers and oceans. Amer. Jour. Sci. (264):507-525

Molerio Leon, Leslie F. (1985): Dominios de flujo y jerarquización del espacio en acuíferos cársicos. Resumen. Simp. XLV Aniv. Soc. Espeleol. cuba, La Habana, :52-53

Molerio Leon, Leslie F. (1990): Investigaciones hidrogeológicas en cuencas representativas del Occidente de Cuba. Informe al Consejo de Expertos. Arch. CIRH-INRH, 200:

Molerio León, Leslie F. (1992a): Mareas oceánicas y terrestres en acuíferos cársicos. Resumen. II Congr. Fed. Espeleol. Amér. Latina y el Caribe, Cuba, :17

Molerio León, Leslie F. (1992b): Modelo de Transporte de Masa en la Zona No Saturada de los Acuíferos Cársicos. 1/Algoritmo ADRIANA (versión 2.91). 1er Taller Iberoamericano de Informática y Geociencias, Acad. Cienc. Cuba, La Habana, : 34

Molerio León, Leslie F. (1992c): Procesos de Transporte de Masa en la Zona No Saturada de los Acuíferos Cársicos Tropicales. GTICEK. Taller Internac. Sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas, Publ. Universitat Jaume I de Castelló,:1-15.

Molerio León, Leslie F. (1994): Isotopic and Geochemical Regionalization of a Tropical Karst Aquifer. Internatl. Symp. isotopes in Water Resources Management; OIEA, Vienna, Austria, Paper IAEA-SM-336/88P, 6:

Molerio León, Leslie F.; P. Maloszewski; M.G. Guerra Oliva; O. A. Regalado; D. M. Arellano Acosta; C.

March Delgado & K. del Rosario (1993): Dinámica del Flujo Regional en el Sistema Cársico Jaruco-Aguacate, Cuba. in/ Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 1994, IAEA TECDOC-835, Viena, :139-174

Molerio León, Leslie F.; Yoemí Portuondo López & Yamilé Bustamante Allen (1996): Migración de Hidrocarburos en Acuíferos Cársicos. Factores de Control de Transporte y pronóstico del Movimiento. Taller Nac. Manejo de Desastres por Derrame de Hidrocarburos, Estado Mayor Nac. Def.Civ, Sherritt Co., Geopetrol., C. de La Habana, :19.

Molerio León, L.F.; A. Menéndez Gómez; E. Flores Valdés; M.G. Guerra Oliva & C. Bustamante Allen (1997): Potencial y Recursos de Aguas Subterráneas en las Zonas de Montaña de Cuba. in/D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín & I. Antigüedad (Eds.): Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eibar, País Vasco: 211-224

Molerio, L.F.; E. Flores & A. Menéndez (1997): Vulnerability of Karstic Aquifers. Draft Report. IHP-V Project 3.2. Monitoring Strategies for Detecting Groundwater Quality Problems, La Habana, 10:

Myers, J.E. (1966): Momentum, heat and mass transfer. Edit Univ. Habana, La Habana, 695:

Sugawara, K. (1967): Migration of elements through phases of the hydrosphere and atmosphere. in Vinogradov, A. P.: Chemistry of the Earth's Crust. Vol. 2:501-510.

Taylor, S.A. y J.W. Cary (1964): Linear equations for the simultaneous flow of matter and energy in a continuous soil system. Soil Sci.Soc.Amer.Proc. 28(2):167-172

Terlietsky, P. (1975): Física estadística. Edit. Revolucionaria, La Habana, 360:

Todd, D. K. (1970): Groundwater Hydrology. Edic. Revolucionaria, Inst. Cub. Libro, La Habana, 336:

Wallick, E. I.; J. Tóth (1976): Methods of regional groundwater flow analysis with suggestions for the use of environmental isotopes. Proc. Symp. Interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology, IAEA, Viena: 37-64

Yera Digat, G. & L.F. Molerio León (1997): Hidrodinámica Geoquímica del Sistema Acuífero de la Costera Sur de Camaguey. in/D.M. Arellano, M.A. Gómez-Martín & I. Antigüedad (Eds.): Investigaciones Hidrogeológicas en Cuba. Eibar, País Vasco: 125-134

Zalewski, M., G.A. Janauer, G. Jolankai (1997): Ecohydrology. A new paradigm for sustainable use of aquatic resources. Unesco, IHP-V Projects 2.3/2.4, Paris, 58: