

63088

**ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES E INDICADORES
UTILIZADOS PARA DEFINIR EL ESTADO DE LOS
ACUÍFEROS.**

AÑO 2004



MINISTERIO
DE EDUCACIÓN
Y CIENCIA



Instituto Geológico
y Minero de España



INFORME	Identificación: H4-002-06
	Fecha: 22-05-2006
TÍTULO: ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES E INDICADORES UTILIZADOS PARA DEFINIR EL ESTADO DE LOS ACUÍFEROS.	
PROYECTO: VALORACIÓN NUMÉRICA DEL ESTADO Y EVOLUCIÓN DE LOS ACUÍFEROS. METODOLOGÍA NUMÉRICA PARA DEFINIR LA EVOLUCIÓN DE LOS ACUÍFEROS CON PROBLEMAS INDUCIDOS POR LA EXPLOTACIÓN DE LOS RECURSOS. ASPECTOS CUANTITATIVOS Y DE CALIDAD.	
RESUMEN: <p>Este trabajo hace un análisis de los indicadores sobre el estado de las aguas subterráneas, empleados hasta el momento en España, los compara con los empleados en otros países y continúa con la línea emprendida para definir nuevos indicadores para incluirlos en los denominados perfiles de llenado y de calidad. En el informe se resume el estado del conocimiento sobre indicadores, haciendo un análisis detallado y se recoge un planteamiento conceptual basado en diferentes tratados de estadística, se enuncian dichos indicadores e índices, diferenciándolos según estén relacionados con la cantidad o con la calidad del agua subterránea. De cada uno de ellos se dice el tipo al que pertenece (presión, estado o respuesta), la descripción, el uso y el nivel de implantación hasta el momento actual. Todo ello se plantea con la premisa de que los índices o perfiles que se proponen tengan rigor científico, pero con una interpretación de comprensión rápida e intuitiva para los gestores, usuarios del recurso hídrico y para la sociedad en general.</p> <p>Este informe se ha generado como uno de los documentos necesarios para conseguir los objetivos del proyecto "<i>Valoración numérica del estado y evolución de los acuíferos. Metodología numérica para definir la evolución de los acuíferos con problemas inducidos por la explotación de los recursos. Aspectos cuantitativos y de calidad</i>".</p>	
Revisión Nombre: Juan Antonio López Geta Unidad: Hidrogeología y Aguas Subterráneas Fecha:	Autores: José María Pernía Llera (IGME) Beatriz Alonso Santos (IGME) Responsable: José María Pernía Llera

El presente estudio titulado “**Análisis de los índices e indicadores utilizados para definir el estado los acuíferos**” se ha generado como uno de los documentos necesarios para conseguir los objetivos del proyecto “ *Valoración numérica del estado y evolución de los acuíferos. Metodología numérica para definir la evolución de los acuíferos con problemas inducidos por la explotación de los recursos. Aspectos cuantitativos y de calidad*”

Director del Proyecto:

José María Pernía Llera.

Autores del estudio:

José María Pernía Llera.

Beatriz Alonso Santos.

ÍNDICE

1. PRESENTACIÓN	1
2. INTRODUCCIÓN CONCEPTUAL	2
3. ANTECEDENTES EN EL IGME.....	7
4. METODOLOGÍA PARA EFECTUAR EL ANÁLISIS	9
5. INDICADORES E ÍNDICES RELACIONADOS CON LA CANTIDAD	10
5.1. Indicadores e índices propuestos por Groundwater Indicators Working Group (UNESCO, IAEA, IAH y UNECE)	10
5.1.1. Recursos de agua subterránea por habitante	10
5.1.2. Recarga respecto a las extracciones totales de agua subterránea.....	11
5.1.3. Extracciones totales respecto a recursos explotables de agua subterránea	12
5.1.4. Agua superficial respecto al agua subterránea usada para beber.....	13
5.1.5. Indicador del agotamiento del agua subterránea.....	14
5.1.6. Recursos no renovables totales respecto a la extracción anual de recursos no renovables de agua subterránea.....	15
5.2. Perfil de Llenado utilizado por el IGME.....	16
5.2.1. Evolución gráfica de los niveles piezométricos	17
5.2.2. Tendencias de los niveles piezométricos.....	18
5.2.3. Representación de la evolución anual entre máximos y mínimos históricos	18
5.2.4. Índice de llenado.....	19
5.2.5. Representaciones cartográficas de la variación de llenado.....	21
5.3. Otros indicadores e índices	22
5.3.1. Índice de estado	22
5.3.2. Índice de llenado basado en la evolución de volúmenes	24
5.3.3. Indicador de estado de sobreexplotación	26
5.3.4. Intensidad del uso del agua	26
5.3.5. Perfil de sequía	27
5.3.6. Uso urbano de las aguas subterráneas.....	28

6. INDICADORES E ÍNDICES RELACIONADOS CON LA CALIDAD	30
6.1. Indicadores e índices propuestos por Groundwater Indicators Working Group (UNESCO, IAEA, IAH y UNECE)	30
6.1.1. <i>Indicador de calidad de las aguas</i>	30
6.1.2. <i>Indicador de usos del agua respecto al tratamiento</i>	31
6.2. Perfil de Calidad utilizado por el IGME	32
6.2.1. <i>Análisis de sulfatos</i>	32
6.2.2. <i>Análisis de nitratos</i>	33
6.2.3. <i>Análisis de cloruros</i>	34
6.2.4. <i>Potabilidad de las aguas subterráneas</i>	35
6.3. Otros indicadores e índices	35
6.3.1. <i>Índice particularizado de intrusión marina (IPI)</i>	36
6.3.2. <i>Acuíferos costeros salinizados por intrusión marina</i>	37
6.3.3. <i>Acuíferos contaminados por nitratos</i>	38
6.3.4. <i>Características de calidad</i>	39
7. CUADRO RESUMEN	40
8. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES PARA EL DESARROLLO FUTURO DE INDICADORES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	41
9. REFERENCIAS	45

1. PRESENTACIÓN

Cuando el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) pretende profundizar en el conocimiento de índices e indicadores de las aguas subterráneas, los autores de este informe después de efectuar la recopilación de informes y publicaciones en la materia, nos encontramos que generalmente los planteados hasta el momento no tienen una formulación definida, su ámbito de aplicación es genérico, su validez y forma de presentarlos muy heterogénea, cuando no se mezclan los conceptos de índices e indicadores. Con toda la información encontrada se llega a la conclusión de que actualmente la aplicación de índices e indicadores está en una fase inicial que precisa su análisis detallado, efectuar un planteamiento metodológico con contenido matemático y una aplicación práctica para conocer su validez.

Se inicia pues una serie de trabajos que se plantean en tres etapas. La primera de ellas que se presenta en este trabajo, recoge un planteamiento conceptual basado en diferentes tratados de estadística. Desarrollando a lo largo de él los diferentes índices e indicadores conocidos hasta el momento, analizando su campo de aplicación. Para ello se han separado en dos grandes grupos por un lado los relacionados con la cantidad del recurso hídrico subterráneo, por otro los relativos a la calidad y a las características físico-químicas. También se efectúa el planteamiento para su desarrollo futuro, que se realizará en las otras dos etapas previstas inicialmente en dos tipos de acuíferos. La aplicación de los índices e indicadores se efectuará en las unidades hidrogeológicas de La Sierra de Estepa y de la Mancha Oriental, pertenecientes respectivamente a las Cuencas Hidrográficas del Guadalquivir y del Júcar.

Posteriormente al inicio de este trabajo el Groundwater Indicators Working Group, grupo de trabajo integrado por UNESCO, IAEA, IAH y UNECE, solicitó a la Dirección General del IGME que se efectuase el análisis y la aplicación de una serie de indicadores que habían definido con mayor o menor extensión en el “Draft Document-Viena”. Esta petición enriquecía los objetivos de este trabajo y contribuía a la unificación de criterios para la implantación de los índices e indicadores de las aguas subterráneas, por lo que se incorporó a los objetivos generales del proyecto, y en particular a este estudio.

2. INTRODUCCIÓN CONCEPTUAL

Un indicador es una variable configurada científicamente y dotada socialmente de un significado añadido al propio, con el fin de reflejar de forma sintética una preocupación social e insertarla coherentemente en el proceso de toma de decisiones (MIMAM, 1996). No siempre es un número, puede ser un signo, una figura o un color.

Los indicadores son herramientas obtenidas para medir variaciones. Intentan reducir un número de factores diferentes a términos comparables entre sí y sustituir estos términos parciales por uno que represente a todo el conjunto.

Surgen principalmente por dos razones:

- Contar con información adecuada para tomar decisiones y satisfacer la demanda de información pública.
- Reducir la información a un número manejable de parámetros.

La información que generan los indicadores debe ser útil para:

- Evaluar los efectos de los planes o proyectos políticos
- Ayudar a ver el desarrollo de nuevas acciones
- Informar de manera sencilla y rápida.

Dicha información puede ser de varios tipos: descriptiva; medidas regulares que dan lugar a tendencias; comunicativa; como factor de decisión comparando con un valor de referencia; para hacer predicciones futuras (UNESCO-WWAP, 2003).

La optimización en los indicadores debe permitir que con el menor número de ellos se recoja la mayor información posible. Utilizar un número reducido de indicadores es un objetivo básico del sistema nacional y una permanente recomendación internacional (MIMAM, 1998). Sin embargo, otros aspectos como la indefinición de los parámetros, la incertidumbre sobre la calidad de las estadísticas y las dificultades técnicas y

metodológicas para su elaboración, también han sido aspectos decisivos para intentar utilizar el menor número posible de indicadores.

Hablamos de **índice** cuando se fusionan variables en una sola, de forma que resulta un parámetro adimensional. Entre las utilidades de los mismos están:

- Dar un valor numérico.
- Comparar valores.
- Representar gráficamente a lo largo del tiempo o del espacio
- Definir intervalos de valores asignándoles una importancia y un color:
 - rojo → alto
 - azul → medio
 - verde → bajo
- Representación cartográfica del valor de los índices. Pueden utilizarse distintos colores para diferentes intervalos.

Los índices se pueden clasificar en dos grupos: índices elementales o simples, e índices sintéticos o complejos (Calot G. 1974; Chacón E., 1965).

Si se considera una evolución temporal de una magnitud G : G_0, G_1, \dots, G_t , donde en este caso los subíndices se refieren a instantes sucesivos de tiempo, pero dicha numeración puede referirse al espacio (regiones geográficas) o cualquier criterio (por ejemplo, categorías sociales), se llama índice elemental de la magnitud G en el periodo t respecto al periodo 0 a la razón:

$$I_{t/0}(G) = \frac{G_t}{G_0}$$

Es un número adimensional que cumple las propiedades: circular, adición, multiplicación y división.

El índice se llama sintético o complejo cuando sintetiza en un índice único varios índices elementales. Deberá si es posible poseer propiedades análogas a las de los índices elementales. Los más utilizados están basados en:

- La media aritmética (índice de Laspeyres)
- La media armónica (índice de Paasche)
- La media geométrica (índice de Fisher).

También se construyen índices complejos definiendo una escala y dando unos pesos a los índices simples, de manera que queden reflejadas las preferencias sociales. En esta línea está el Índice de Sostenibilidad Ambiental (ESI), realizado por el World Economic Forum (WEF, 2002), y aplicado por (Cabrera et al., 2002), que indica mediante un parámetro único el grado de progreso de un país hacia la sostenibilidad medioambiental.

Hablamos de **perfil** cuando se seleccionan varios indicadores con un fin. Así, definimos perfil ambiental como la selección de varios indicadores ambientales que en su conjunto, o en partes, dan cuenta del estado de la cuestión para un sistema, una política, un problema o un espacio territorial determinado.

Se pueden encontrar diversos marcos de análisis para la clasificación de los indicadores, entre los que destacan:

- Marco temático. Los indicadores se estructuran en base a problemas específicos (Ej.: eutrofización de las aguas).
- Estructura por medios. Los indicadores cubren cada medio (agua, aire, suelo y recursos bióticos) de forma separada.
- Marco sectorial. El sistema se estructura en base a sectores económicos (agricultura, pesca, minería y energía).
- Marco causal. El sistema se ordena siguiendo las pautas del proceso de toma de decisiones, donde se considera que el medio sufre variaciones en su estado como consecuencia de la presión que ejercen las actividades humanas, y donde la sociedad responde a tales cambios modulando el deterioro a través del desarrollo de las políticas.
- Enfoque espacial. Se clasifican según la escala espacial a la que se puedan referir (escala local, nacional, regional y global).
- Marco ecosistémico. Los indicadores se refieren a unidades territoriales con características ecológicas distintivas (costas, ríos,...).

El marco dominante para la clasificación es el causal (OCDE, 1994), que da lugar a tres tipos de indicadores:

- Presión. Reflejan acciones directas o indirectas sobre el medio.
- Estado del medio. Descriptivos de la calidad del medio y de los recursos naturales.
- Respuesta. Indicativos del nivel de esfuerzo social y político

En cuanto al agua subterránea, los indicadores también se pueden clasificar en dos grupos: indicadores de cantidad e indicadores de calidad. Los primeros representan la variación volumétrica del agua subterránea y otras variables cuantitativas, principalmente se refieren a volúmenes y niveles piezométricos, mientras que los segundos se centran en estudiar la calidad del agua (características hidroquímicas), para determinar si esa agua es apropiada para el uso que se le quiere dar: abastecimiento urbano, riego,...

Los **criterios** más utilizados para la selección de un indicador son:

- Validez científica. Debe estar basado en un conocimiento científico consistente.
- Representatividad. Debe ser representativo de la condición del todo.
- Sensibilidad a cambios. Debe señalar los cambios de tendencia, preferiblemente a corto plazo.
- Fiabilidad de los datos. Los datos deben ser lo más fiables posible y de buena calidad.
- Relevancia. Debe proveer información de relevancia para los usuarios y para determinar objetivos y metas en el ámbito de formulación de políticas.
- Comprensible. Debe ser simple y claro, entendible por no especialistas.
- Predictivo. Debe proveer señales de alarma previa de futuras tendencias negativas.
- Metas. Debe proponer metas a alcanzar, con las que poder comparar la situación actual.
- Comparable. Debe ser presentado de tal forma que permita comparaciones interterritoriales.

- Cobertura geográfica. Debe ser nacional o basarse en temas de carácter regional extensibles a escala nacional.
- Coste-eficiencia. Debe ser eficiente administrativamente en términos de coste de obtención de datos y de uso de la información.

3. ANTECEDENTES EN EL IGME

La comparación de los valores numéricos de datos hidrogeológicos entre distintos acuíferos de la misma o de diferentes cuencas hidrográficas es una labor complicada, ya que para ello se precisa que los datos sean homogéneos, tanto en la metodología de toma como en la periodicidad de medida. Para que los datos puedan ser comparables entre sí, precisan al menos una de las siguientes características: que tengan un valor numérico homogéneo; que se puedan visualizar gráficamente; que admitan una representación cartográfica georreferenciada.

El Instituto Geológico y Minero de España ha desarrollado y aplicado una serie de índices e indicadores cuyo conjunto integran un perfil que se denomina Perfil de Llenado de un acuífero o de un sector de él, desarrollado en el apartado 5.2. Este perfil se calcula a partir de los datos de una serie histórica de piezometría. Por medio de estos datos se obtiene una evolución anual, enmarcada entre las curvas de valores de máximos y mínimos históricos mensuales de todos los años que componen la serie considerada. Esta representación nos permite obtener con la aplicación de una fórmula, el valor del índice de llenado, valor numérico que permite efectuar comparaciones. Con la representación gráfica de valores también se puede comprobar si la situación de llenado es mayor, menor o igual que en una época anterior, lo cual permite efectuar una representación cartográfica de la situación de los acuíferos. El Perfil de Llenado incluye un análisis de las tendencias de los niveles a medio y a largo plazo.

El perfil del estado cualitativo de un acuífero, o Perfil de Calidad, no se ha definido íntegramente. Sin embargo se han ido aplicando algunos índices e indicadores que en el futuro pueden integrarse en dicho perfil. Entre estos se encuentran los análisis de tendencias a largo y medio plazo de los parámetros más significativos de la contaminación, como son los sulfatos, nitratos y cloruros. También se encuentran los mapas de potabilidad de los acuíferos, y el análisis porcentual de los acuíferos de una cuenca hidrográfica con un determinado contenido de un elemento o sustancia.

Durante la adscripción del Instituto Geológico y Minero de España al Ministerio de Medio Ambiente se ha aplicado esta metodología en diversos trabajos. Entre ellos podemos mencionar: Los informes semestrales de Redes de Control de las Aguas Subterráneas, años 1995 a 2001 (ITGE-DGOHCA); el Boletín de Información Hidrogeológica, Red Piezométrica Nacional, año 1998 (ITGE); el capítulo mensual para el Informe de Coyuntura del Ministerio de Medio Ambiente, años 1998 a 2001; el informe sobre llenado de los acuíferos y calidad de las aguas subterráneas, dentro del convenio de colaboración entre el Instituto Geológico y Minero de España y la Confederación Hidrográfica del Júcar, años 2000 y 2001 (ITGE-CHJ). También se presentan estos datos del Perfil de Llenado en la web del IGME con el título de “Situación de las Aguas subterráneas en España”.

Desde la adscripción del IGME al Ministerio de Ciencia y Tecnología se suspendió la realización de los citados informes, aunque continúa realizándose el “Informe de Coyuntura del Ministerio de Medio Ambiente” por la Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. También se realiza el “Informe de seguimiento del Índice de Estado de la Red Básica de piezometría en el ámbito territorial de la Confederación” por parte de la Confederación Hidrográfica del Júcar.

4. METODOLOGÍA PARA EFECTUAR EL ANÁLISIS

El IGME tiene intención de continuar con estos trabajos, bien en la línea emprendida, o bien iniciando otros planteamientos nuevos. Esta línea de trabajo se plantea con la premisa de que los índices o perfiles que se propongan tengan rigor científico, pero con una interpretación de comprensión rápida e intuitiva para los gestores, usuarios del recurso hídrico y para la sociedad en general.

Como paso previo se ha realizado una recopilación bibliográfica de las actividades llevadas a cabo en este ámbito por diversas instituciones, complementándose con la información obtenida a través de Internet. Entre esta documentación figuran índices o indicadores que se han aplicado o se están aplicando en la actualidad. También se han recopilado aquellos que se han definido en estudios de diversa naturaleza, aunque en muchos casos sólo ha sido a nivel conceptual sin que se hayan aplicado nunca, o como mucho en la aplicación práctica del estudio de definición. Esta bibliografía se recoge en el apartado 9 del presente documento.

En los apartados 5 y 6 se enuncian dichos indicadores e índices, diferenciándolos según estén relacionados con la cantidad o con la calidad del agua subterránea. De cada uno de ellos se dice el tipo al que pertenece (presión, estado o respuesta), la descripción, el uso y el nivel de implantación hasta el momento actual.

Como se ha dicho anteriormente, los indicadores pueden clasificarse y agruparse por diversos criterios, dándose el caso de que algunos de ellos cumplen varios criterios y pueden utilizarse para varios fines, por lo que es una tarea difícil situarlos en un sólo lugar. Para facilitar su utilización posterior, en este informe se presentan clasificados por los grupos de trabajo o instituciones que los definen o utilizan. Así se encuentran agrupados los desarrollados por Groundwater Indicators Working Group y los aplicados por el IGME, CHJ y MIMAM.

5. INDICADORES E ÍNDICES RELACIONADOS CON LA CANTIDAD

A continuación se presentan los indicadores e índices de cantidad que se han aplicado o se están aplicando en la actualidad, así como aquellos que se han definido en estudios de diversa naturaleza.

Se presentan clasificados en tres grupos: Indicadores e índices propuestos por Groundwater Indicators Working Group, GIWG, (UNESCO, IAEA, IAH y UNECE), indicadores e índices utilizados por el IGME que constituyen el Perfil de Llenado de un acuífero y otros indicadores e índices.

5.1. *Indicadores e índices propuestos por Groundwater Indicators Working Group (UNESCO, IAEA, IAH y UNECE)*

En este apartado se recogen los indicadores e índices de cantidad propuestos por Groundwater Indicators Working Group en su último documento (Groundwater Indicators Working Group, 2003), resultado de las conclusiones de la reunión del grupo de trabajo realizada en Viena, junio 2003, en la que se modificaron los indicadores e índices propuestos en una reunión anterior realizada en París, enero 2002 (Groundwater Indicators Working Group, 2002). Se recoge, por tanto, la última versión de dichos indicadores e índices.

5.1.1. Recursos de agua subterránea por habitante

TIPO: Indicador de estado

DESCRIPCIÓN: Recursos al año (m^3 /año) que existen por habitante.

$$\frac{\text{Recursos de agua subterránea}}{\text{Habitantes}} \left[\frac{m^3/\text{año}}{\text{habitante}} \right]$$

Indica la disponibilidad de agua subterránea como recurso para beber, agricultura , y otros propósitos. Es un indicador de cantidad importante a nivel global o nacional.

UTILIZACIÓN: Sirve para estudiar la disponibilidad de los **recursos** hídricos de agua subterránea.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Propuesto (Groundwater Indicators Working Group, 2003).

También propuesto anteriormente por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA, 1995) en lo que se refiere a los recursos respecto los diferentes usos (abastecimiento, regadío, industria y refrigeración) por habitante.

5.1.2. Recarga respecto a las extracciones totales de agua subterránea

TIPO: Índice de presión

DESCRIPCIÓN: Porcentaje de la recarga que recibe el acuífero respecto a las extracciones que se realizan en el mismo:

$$\frac{\text{Recarga}}{\text{Extracciones totales}} \times 100 [\%]$$

La recarga de agua subterránea (GIWG, 2003) se considera como la adición de agua a las reservas de agua subterránea. Para la construcción de este índice se emplea la recarga natural por flujo de agua a través de la zona no saturada, que es generalmente la forma de recarga más importante en las zonas áridas y semiáridas. Las fuentes de recarga principales son la lluvia, agua de masas superficiales, pérdidas de riego y zonas urbanas.

Las extracciones totales de agua subterránea (GIWG, 2003) engloban el agua total extraída de una masa de agua subterránea mediante pozos, sondeos, manantiales y otras vías para abastecimiento urbano, agricultura, industria u otros usos.

Se distinguen dos escenarios anuales distintos según el valor del índice:

- 1) Escenario 1: Balance sostenible de agua subterránea
extracciones \leq recarga + recarga inducida
- 2) Escenario 2: Agua subterránea sobreexplotada
extracciones $>$ recarga + recarga inducida

UTILIZACIÓN: Conocer el nivel de **explotación** del acuífero.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Índice teórico propuesto (Groundwater Indicators Working Group, 2003). Se está evaluando su implantación.

La inversa de este índice se ha empleado en varios trabajos: (López-Camacho et al., 1991) y (MINER, 1994) denominándolo indicador de estado de sobreexplotación.

5.1.3. Extracciones totales respecto a recursos explotables de agua subterránea

TIPO: Índice de presión

DESCRIPCIÓN: Porcentaje de extracciones totales que se realizan en el acuífero respecto la cantidad de recursos explotables del mismo:

$$\frac{\text{Extracciones totales}}{\text{Recursos explotables}} \times 100 [\%]$$

Las extracciones totales de agua subterránea (GIWG, 2003), al igual que en el índice anterior, engloban el agua total extraída de una masa de agua subterránea mediante pozos, sondeos, manantiales y otras formas de captación para abastecimiento urbano, agricultura, industria u otros usos.

Los recursos explotables de agua subterránea (GIWG, 2003) se definen como la cantidad de agua que puede ser extraída de un acuífero bajo las necesidades socio-económicas actuales y mantenimiento de las condiciones ecológicas.

Se distinguen los dos escenarios siguientes:

- 1) Escenario 1: Desarrollo sostenible
extracciones \leq recursos explotables
- 2) Escenario 2: Desarrollo insostenible
extracciones $>$ recursos explotables

UTILIZACIÓN: Conocer el nivel de **explotación** del acuífero.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Índice teórico propuesto (Groundwater Indicators Working Group, 2003).

5.1.4. Agua superficial respecto al agua subterránea usada para beber

TIPO: Índice de estado

DESCRIPCIÓN: Relación entre el agua superficial y el agua subterránea empleada para beber en un país.

$$\frac{\text{Agua superficial}}{\text{Agua subterránea}} [\%]$$

Se propone que este índice se use en combinación con el índice de extracciones totales respecto a recursos explotables de agua subterránea (apartado 5.1.3), porque ambos están relacionados.

UTILIZACIÓN : Estudia el **uso** de los **recursos**.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Ampliamente utilizado en los estudios de utilización del agua y propuesto por (Groundwater Indicators Working Group, 2003) en el ámbito nacional.

5.1.5. Indicador del agotamiento del agua subterránea

TIPO: Indicador de estado

DESCRIPCIÓN: El estado de agotamiento se puede definir mediante la medida de los niveles piezométricos del acuífero, a los que se aplica un análisis estadístico, conjuntamente con el índice de recarga respecto a las extracciones totales de agua subterránea (apartado 5.1.2) para identificar las fluctuaciones naturales.

Los niveles piezométricos deberían medirse de manera continua, diariamente, al mes, o al menos durante las estaciones seca y húmeda del año, durante un periodo no menor de 5 años.

El uso correcto de este indicador de agotamiento del agua subterránea, para describir la situación actual de explotación del agua subterránea, debe considerar las siguientes limitaciones:

- La determinación previa del modelo conceptual de flujo ayuda a diseñar bien la red de control de piezométrico.
- El conocimiento de la estructura geológica, el modelo conceptual hidrogeológico y el diseño de los piezómetros, permite establecer una correlación entre la medida de los niveles piezométricos del agua y el impacto sobre el acuífero.
- La localización de los piezómetros puede causar interferencias hidráulicas.
- En los sondeos donde no se realizan bombeos continuos a los largo del tiempo se producen situaciones transitorias.

Debido a dichas limitaciones para que el indicador sea fiable debe considerar también otras variables:

Cambio del flujo base: En algunas zonas, los ríos y masas de agua superficiales reciben un importante volumen de agua procedente del flujo base del agua subterránea. Una drástica reducción de este flujo y la pérdida del flujo base se pueden asociar con el agotamiento del agua subterránea.

Cambios en las características de calidad del agua subterránea: Aunque las propiedades físico-químicas pueden variar a través del acuífero, en una explotación regular no se esperan cambios drásticos en la calidad. Sin embargo, los cambios en la edad y origen del agua subterránea en determinadas zonas del acuífero pueden apuntar hacia un agotamiento.

Subsidencia del terreno: La explotación de agua subterránea de acuíferos o acuitardos no consolidados ha conllevado a que en algunas zonas aparezcan asentamientos significativos del terreno. En dicha situación el asentamiento del terreno se puede considerar como indicador indirecto de una explotación no sostenible.

UTILIZACIÓN: No está definido íntegramente, pero se aproxima conceptualmente al Perfil de Llenado considerado por el IGME, que se presenta en el apartado 5.2 de este documento.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Índice teórico propuesto (Groundwater Indicators Working Group, 2003).

5.1.6. Recursos no renovables totales respecto a la extracción anual de recursos no renovables de agua subterránea

TIPO: Indicador de presión

DESCRIPCIÓN: Relación entre los recursos no renovables totales de agua subterránea y la extracción de los mismos en un año. Aporta un valor aproximado de la duración de los recursos no renovables del acuífero.

$$\frac{\text{Recursos no renovables totales } [m^3]}{\text{Extracción anual de recursos no renovables de agua subterránea } [m^3/año]}$$

Recursos no renovables de agua subterránea (GIWG, 2003) son los recursos de agua donde la recarga es escasa o no se produce.

La extracción de recursos no renovables de agua subterránea (GIWG, 2003) se define como la cantidad de agua que puede ser extraída de un acuífero bajo las necesidades socio-económicas actuales y mantenimiento de las condiciones ecológicas. La extracción total anual engloba el agua total extraída de una masa de agua subterránea mediante pozos, sondeos, manantiales y otras vías para abastecimiento urbano, agricultura, industria u otros usos. Para el cálculo del indicador se tomará igual a la media sobre un rango de años significativo.

UTILIZACIÓN: Estudia el agotamiento de los **recursos** no renovables del agua subterránea.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Propuesto (Groundwater Indicators Working Group, 2003)

5.2. Perfil de Llenado utilizado por el IGME

En este grupo se recogen una serie de índices e indicadores cuyo conjunto integran lo que se denomina Perfil de Llenado de un acuífero. Se basan principalmente en el tratamiento de los datos del nivel de las aguas subterráneas. Se precisa de una serie histórica de datos con un número de años significativos (figura 1.a), y se representa como punto de partida la evolución anual mes a mes, enmarcada entre los valores máximos y mínimos históricos (figura 1.b).

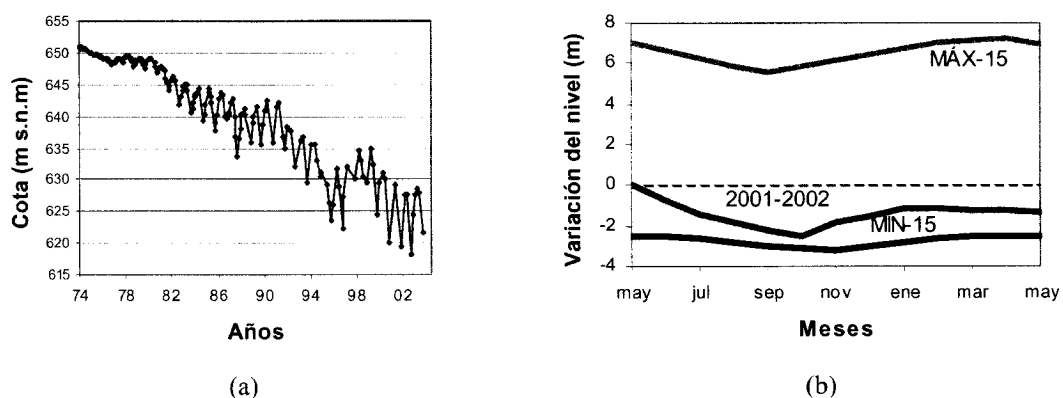


Figura 1. (a) Evolución histórica de los niveles. (b) Evolución anual enmarcada entre los valores máximos y mínimos históricos de los últimos 15 años.

5.2.1. Evolución gráfica de los niveles piezométricos

TIPO: Indicador de estado

DESCRIPCIÓN: Representación gráfica que se realiza en el sistema cartesiano (figura 1.a). En el eje de abscisas se sitúa el tiempo desde el año más antiguo en el que se dispone de medida. En el eje de ordenadas se sitúan los niveles piezométricos medidos en metros sobre el nivel del mar.

La evolución gráfica se efectúa para cada piezómetro de los que componen la red de control. En ocasiones el IGME utiliza la evolución media de cada unidad hidrogeológica, calculada como la media geométrica ponderada de los puntos de control (IGME y DGOH, 1995), siempre que la red de piezometría tenga un número considerable de puntos y se efectúe la toma de datos en todos los puntos con la misma periodicidad. Cuando un piezómetro no tiene medida, se supondrá para el cálculo que su evolución es igual a la media del resto de los piezómetros. Como puede haber varios piezómetros sin datos simultáneamente, el cálculo se realizará mediante un proceso iterativo por aproximaciones sucesivas. Este valor no se debe tomar como valor absoluto, ya que puede variar en función de los piezómetros considerados. Sin embargo, las oscilaciones observadas dan una imagen gráfica muy precisa del comportamiento de la Unidad en su conjunto ya que están poco influenciadas por fenómenos locales (bombeos en pozos cercanos, etc.) que afectan a las evoluciones de los piezómetros representados individualmente.

No es un indicador propiamente dicho, pero se considera debido a que para obtener el denominado Perfil de Llenado, se parte de una serie histórica completa de datos, con un número de años suficientes de medida y una periodicidad anual adecuada, para que los datos que se interpolen en los meses donde no hay medidas sean el menor número posible.

UTILIZACIÓN: Básica en los estudios hidrogeológicos. Puede dar información sobre un punto de control o sobre el acuífero, si hay suficientes puntos de control en él. Permite comparar acuíferos entre sí, aunque exige que las series históricas sean de los mismos años.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Utilización genérica e imprescindible en cualquier estudio hidrogeológico.

5.2.2. Tendencias de los niveles piezométricos

TIPO: Indicador de estado

DESCRIPCIÓN: Es el valor de la pendiente de la recta de regresión de la evolución piezométrica histórica de un número determinado de años. Se habla de tendencia a medio o largo plazo dependiendo del número de años que se consideren en la serie histórica. Sus unidades son metros / año.

Una tendencia positiva significa que los niveles ascienden y negativa que descienden, en ambos casos con el valor de la pendiente.

UTILIZACIÓN: Medida del estado del recurso.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Es un indicador comúnmente utilizado. Así el Instituto Geológico Minero de España lo ha utilizado en sus informes semestrales (IGME Y DGOH, 1995) desde 1995 hasta 2000.

En los informes de Coyuntura desarrollados por el Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM 1999, 2000) se estudian las tendencias a largo plazo obteniendo las unidades que aumentan, las que disminuyen y las que se mantienen estables.

5.2.3. Representación de la evolución anual entre máximos y mínimos históricos

TIPO: Indicador de estado

DESCRIPCIÓN: Representación gráfica anual de los niveles piezométricos (figura 1.b). En el eje de abscisas se sitúan los meses del año, siendo el último valor el del mes que se quiere comparar con el año anterior. En el eje de ordenadas se pueden poner valores absolutos o bien relativos, situando el origen donde se desee, aunque es aconsejable ponerlo en el mes del año anterior al del análisis de datos, ya que de esta forma pueden compararse los niveles piezométricos y conocer si existe un mayor o menor nivel respecto a la misma época del año anterior.

Es el punto de partida para el cálculo de índices y representaciones que conforman el Perfil de Llenado, ya que la situación que ocupa la evolución anual en un mes entre las oscilaciones máximas y mínimas definirán el índice de llenado, que se verá a continuación (apartado 5.2.4).

UTILIZACIÓN: Permite comparar la situación de un mes con los meses anteriores (mayor, menor o igual). A partir de esta representación se obtiene el índice de llenado, y se pueden sacar valores para una representación cartográfica de variaciones de llenado.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Se utilizó en los informes de Coyuntura desarrollados por el IGME (MIMAM 1999, 2000), y desde el 2001 hasta el momento actual, lo emplea el Ministerio de Medio Ambiente en sus informes de coyuntura. También lo incluye la Confederación Hidrográfica del Júcar en sus estudios (CHJ, 2001 y 2002).

5.2.4. Índice de llenado

TIPO: Índice de estado

DESCRIPCIÓN: Se define como nivel de llenado en una fecha determinada respecto a un periodo histórico de años, al cociente entre el incremento del nivel medido respecto al nivel mínimo histórico y la diferencia de los valores máximos y mínimos históricos en dicha fecha (Pernía y Corral, 2000), (figura 2). El valor está comprendido entre 0 y 1, por lo que se multiplicará por 100 si se desea reflejar en porcentajes.

$$(N_h)_i = \frac{\Delta NP_i}{(\Delta NP_T)_i} = \frac{NP_i - (NP_{MIN})_i}{(NP_{MAX})_i - (NP_{MIN})_i}$$

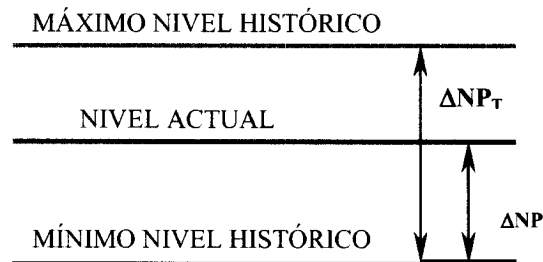


Figura 2. Definición del Índice de llenado

donde:

h , es el periodo histórico (años)

i , es la fecha (mes) en que se efectúa la medida

NP , es el nivel piezométrico medido en el mes

NP_{MAX} , es el nivel piezométrico máximo de la fecha en el periodo histórico considerado

NP_{MIN} , es el nivel piezométrico mínimo de la fecha en el periodo histórico considerado

Se incluye la última medida en la serie de datos históricos, para que no existan valores superiores a uno, ni inferiores a cero ($0 \leq N_h \leq 1$).

La ponderación de valores del nivel de llenado es la siguiente:

$N_h = 1$	Mayor nivel del periodo histórico
$0,5 < N_h < 1$	Recuperación del nivel
$N_h = 0,5$	Valor medio del periodo histórico
$0,3 \leq N_h < 0,5$	Acuífero o área con explotación fuerte
$0,15 \leq N_h < 0,3$	Acuífero o área con explotación intensiva
$0 < N_h < 0,15$	Acuífero con riesgo de sobreexplotación
$N_h = 0$	Menor nivel del periodo histórico

El periodo histórico considerado tiene que ser lo suficientemente amplio como para que en él se reflejen distintos tipos de eventos (periodos de lluvia, sequía, bombeos prolongados, etc.). Un periodo de 15 años suele resultar adecuado (Pernía y Corral, 2001).

UTILIZACIÓN: Obtener el valor de llenado de un acuífero.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Este índice se ha utilizado en los informes de Coyuntura del Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM 1999 y 2000) y en los informes realizados en el marco de los convenios de colaboración entre el IGME y la CHJ (Pernía et al., 2000). Posteriormente la Confederación Hidrográfica del Júcar está utilizando este índice con algunas variaciones, considerando la media histórica (CHJ, 2001 y 2002), denominándolo índice de estado, que se desarrolla en el apartado 5.3.1, y a nivel piloto está siendo utilizado por parte de la Confederación Hidrográfica del Ebro (Fidalgo et al., 2002).

5.2.5. Representaciones cartográficas de la variación de llenado

TIPO: Indicador de estado

DESCRIPCIÓN: Indica las variaciones de los niveles de llenado por medio de colores o bien cuantificando el valor de llenado en intervalos de valores.

Los indicadores que integran el Perfil de Llenado pueden representarse cartográficamente, ya que están georreferenciados por las coordenadas de los puntos de control.

Se pueden distinguir dos tipos:

1. Mapa de llenado de los acuíferos. Permite a partir de los valores obtenidos de los índices representar por puntos o por acuíferos, los distintos intervalos de valor de llenado mediante un color.

2. Mapa de situación de los acuíferos. Permite comparar la situación de un acuífero con fechas anteriores, representándose con distintos colores según sean las situaciones de mayor, menor o igual llenado que en la fecha de comparación.

UTILIZACIÓN: Medida del estado del recurso.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: El primero de ellos se utilizó en los informes realizados en el marco de los convenios de colaboración entre el IGME y la CHJ (Pernía et al., 2000), con el índice de llenado. Y actualmente lo sigue empleando la Confederación Hidrográfica del Júcar representando el índice de estado (CHJ, 2001 y 2002).

En cuanto al segundo tipo, en el Boletín de Información Hidrogeológica (Pernía et al., 1998) se encuentran representadas las cuencas con los símbolos “+” y “-“ indicando respectivamente en qué unidades hidrogeológicas han aumentado las reservas y en cuales han disminuido.

En los informes de Coyuntura elaborados por el Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM 1999, 2000) se presenta el mapa denominado “Situación de las unidades hidrogeológicas” que refleja una panorámica a nivel nacional, donde se ilustra la situación de los acuíferos controlados en el mes de estudio comparada con la que había el mismo mes del año anterior.

5.3. Otros indicadores e índices

En este último grupo se encuentran los indicadores e índices que no pertenecen a ninguno de los dos grupos anteriores, pero no por ello menos importantes.

5.3.1. Índice de estado

TIPO: Índice de estado

DESCRIPCIÓN: Está definido por dos cocientes, según el nivel piezométrico esté por encima o por debajo del valor medio del periodo histórico.

$$\text{Si } V_i \geq V_{med} \rightarrow I_e = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_i - V_{med}}{V_{max} - V_{med}} \right)$$

$$\text{Si } V_i < V_{med} \rightarrow I_e = \frac{V_i - V_{min}}{2 \cdot (V_{med} - V_{min})}$$

Donde :

V_i , es el valor de la medida obtenida en el mes de seguimiento

V_{med} , es el valor medio en el periodo histórico

V_{max} , es valor máximo en el periodo histórico

V_{min} , es valor mínimo en el periodo histórico

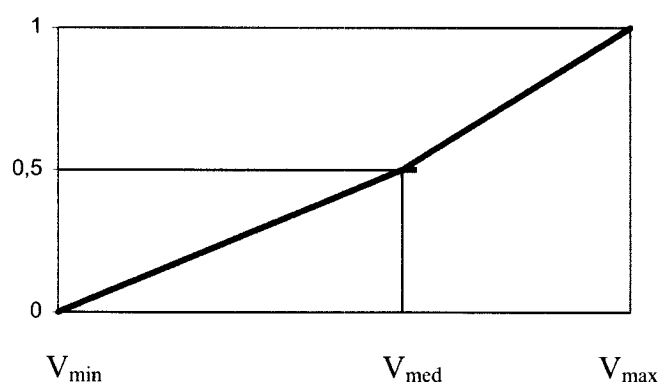


Figura 3. Definición de Índice de estado

En la figura 3 se puede observar que cuando el valor de la medida está comprendido entre la media de la serie y su valor máximo, el índice de estado dará una cifra que oscilará entre 0,5 y 1, mientras que en el caso de que la medida sea inferior al valor medio, lo hará entre 0 y 0,5.

El valor del índice de estado se discretiza en los siguientes niveles:

$I_e = 1$	Máximo nivel histórico (nivel azul)
$0.5 \leq I_e < 1$	Situación estable (nivel verde)
$I_e = 0.5$	Valor medio de la serie histórica
$0.3 \leq I_e < 0.5$	Situación de precaución (nivel amarillo)
$0.15 \leq I_e < 0.3$	Situación de peligro (nivel naranja)

$0 < I_e < 0.15$	Situación de alerta (nivel rojo)
$I_e = 0$	Mínimo nivel histórico (nivel negro)

UTILIZACIÓN: Medida del estado de llenado, relacionando el nivel piezométrico en una fecha determinada con su periodo histórico.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Utilizado por la Confederación Hidrográfica del Júcar en la elaboración de sus informes (CHJ, 2001 y 2002). Procede de una modificación del índice presentado anteriormente en (Pernía y Corral, 2000) y utilizado en los informes de Coyuntura del Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM 1999 y 2000).

5.3.2. Índice de llenado basado en la evolución de volúmenes

TIPO: Índice de estado

DESCRIPCIÓN: Está basado en la evolución del volumen de las reservas explotables (Pernía y Doblas, 1997). Dicha variación se puede cuantificar según:

$$\Delta V = A \cdot S \cdot \Delta H(t)$$

donde

$$H(t) = h(t) + z, \text{ con}$$

$h(t)$, es la cota del agua a partir del nivel de referencia

z , es el espesor del acuífero que puede ser explotado por debajo de la cota de referencia

A , es la superficie del acuífero

S , es el coeficiente de almacenamiento

Las reservas explotables en un instante t vienen dadas por:

$$V(t) = \int_A [h(x,t) + z(x)] \cdot S(x) \cdot dx = \int_A h(x,t) \cdot S(x) \cdot dx + \int_A z(x) \cdot S(x) \cdot dx$$

considerando sólo p puntos de la superficie del acuífero

$$V(t) = \sum_1^p h_i(t) \cdot A_i \cdot S_i + \sum_1^p z_i \cdot A_i \cdot S_i = a \cdot \bar{h}(t) + b$$

$$\sum_1^p A_i = A$$

$\bar{h}(t)$ es la media ponderada con la superficie y el coeficiente de almacenamiento.

Para calcular el indicador se consideran puntos con más de 100 medidas en el periodo de tiempo que comienza en 1975 o antes y termina en la actualidad.

El área que se asocia a cada punto se determina mediante los polígonos de Voronoy, también llamados de Thiessen. En cada polígono se establece: la superficie, el coeficiente de almacenamiento y la profundidad máxima de explotación.

El índice es un porcentaje del valor de los recursos en una fecha determinada. Es un índice de promedios ponderado.

$$V_t = a \cdot \bar{h}_t + b \quad y \quad V_0 = a \cdot \bar{h}_0 + b$$

$$I_t = \frac{V_t}{V_0} \times 100 = \left[\frac{a}{a \cdot \bar{h}_0 + b} \bar{h}_t + \frac{b}{a \cdot \bar{h}_0 + b} \right] \times 100 = m \cdot \bar{h}_t + n$$

El cálculo del índice supone el de los coeficientes m y n, factores de ponderación de la piezometría, que son invariantes en cada acuífero con la red de medidas.

Como referencia para V_0 se adopta octubre de 1975

UTILIZACIÓN : Medida del estado de llenado.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Propuesto por (Pernía y Doblás, 1997), ha evolucionado a la definición y utilización del índice de llenado basado en la evolución de niveles piezométricos o índice de llenado (apartado 5.2.4).

5.3.3. Indicador de estado de sobreexplotación

TIPO: Índice de presión

DESCRIPCIÓN: Cociente entre bombeos y recargas.

$$\text{Índice de sobreexplotación} = \frac{\text{bombeos}}{\text{recarga}}$$

La sobreexplotación se define como el desequilibrio negativo entre los bombeos y la renovación anual de agua en cada unidad (recarga), que pone en peligro la subsistencia de los aprovechamientos hidráulicos existentes en la misma.

UTILIZACIÓN: Sirve para medir el grado de **explotación** del acuífero.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Este índice se ha empleado en varios trabajos: (López-Camacho et al., 1991) y (MINER, 1994). Coincide con el inverso del propuesto por (Groundwater Indicators Working Group, 2003), recarga respecto a extracciones totales de agua subterránea

5.3.4. Intensidad del uso del agua

TIPO: Índice de presión

DESCRIPCIÓN: Es la relación entre extracción media anual de agua (agua que sale del ciclo hidrológico con carácter temporal o permanente) respecto al recurso natural medio interanual.

$$\frac{\text{extracción media anual}}{\text{recurso natural medio interanual}} [\%]$$

La información empleada se basa, en buena parte en estimaciones, por lo que su eficacia es relativa. Además, según la fuente empleada los valores varían.

UTILIZACIÓN: Sirve para medir el grado de **explotación** del acuífero.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Índice definido y aplicado teóricamente por el Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM, 1998), a distintos usos: abastecimiento, agricultura, industria y refrigeración. Sin desarrollo posterior.

5.3.5. Perfil de sequía

TIPO: Indicador de estado

DESCRIPCIÓN: Unión de una serie de factores o indicadores aglutinados para definir y valorar una sequía:

- Evolución piezométrica de los puntos del Inventario de Puntos de Agua. Fecha y niveles.
- Hidrometría y evolución de los caudales aforados en cursos superficiales.
- Evoluciones pluviométricas en las estaciones representativas de cada unidad hidrogeológica.
- Efectos ambientales de la sequía en la fauna y flora de los Espacios Naturales Protegidos vinculados a la unidad.
- Situación actual de la unidad. Usos actuales.
- Técnicas de tratamiento de imágenes aeroportadas y de satélite:
 - 1) Se parte de las imágenes de los satélites disponibles.
 - 2) Se incorporan las imágenes de los sensores aeroportados.
 - 3) Elección de la zona de trabajo a partir de la información del vuelo del INTA.
 - 4) Corrección radiométrica y geométrica de la serie temporal de imágenes.
 - 5) Utilización de técnicas de tratamiento digital.
 - 6) Incorporación de la planimetría e hidrografía 1:25000.

- 7) Corrección de la imagen del LANDSAT con las de los sensores aeroportados.
- 8) Análisis en el espectro del infrarrojo cercano para delimitación del contacto cuerpos de agua-tierra.

Haciendo la interpretación de imágenes que incluyan periodos de sequía y periodos húmedos, se puede buscar una relación de los comportamientos en superficie según la posición relativa del nivel freático.

UTILIZACIÓN: Valorar la situación de sequía

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Aplicada la teoría a los acuíferos de Andalucía vinculados a los Espacios Naturales Protegidos, de los que el IGME tiene información histórica, y a acuíferos vinculados a humedales (Vázquez M. et al., 2001). Sin desarrollo posterior.

5.3.6. Uso urbano de las aguas subterráneas

TIPO: Índice de estado

DESCRIPCIÓN: Porcentaje del volumen de recursos subterráneos de la unidad hidrogeológica que se destinan a satisfacer las demandas urbanas, sobre el volumen total de aprovechamientos de agua subterránea.

$$\frac{\text{Volumen de agua subterránea para uso urbano}}{\text{Volumen total de aprovechamientos de agua subterránea}} [\%]$$

Según los valores obtenidos se establece la siguiente clasificación:

-Uso urbano significativo, cuando el volumen de recursos subterráneos de la unidad captada para abastecimiento urbano supera el 20% del volumen total de aguas subterráneas aprovechadas.

-Uso urbano intermedio, cuando el volumen de recursos subterráneos de la unidad captada para abastecimiento urbano oscila entre el 10% y el 20% del volumen total de aguas subterráneas aprovechadas.

-Uso urbano minoritario, cuando el volumen de recursos subterráneos de la unidad captada para abastecimiento urbano es inferior al 10% del volumen total de aguas subterráneas aprovechadas.

UTILIZACIÓN : Estudia el **uso** de los **recursos**.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Propuesto por (Pernía, Maj-Britt et al., 1999) y aplicado teóricamente a las UH con captaciones de aguas subterráneas para abastecimiento urbano existentes en la Comunidad Valenciana. Sin desarrollo posterior.

6. INDICADORES E ÍNDICES RELACIONADOS CON LA CALIDAD

A continuación se presentan los indicadores e índices relacionados con la calidad que se han aplicado o se están aplicando en la actualidad, así como aquellos que se han definido en estudios de diversa naturaleza.

Se presentan clasificados en tres grupos: Indicadores e índices propuestos por Groundwater Indicators Working Group, GIWG, (UNESCO, IAEA, IAH y UNECE), indicadores e índices utilizados por el IGME que constituyen el Perfil de Calidad de un acuífero y otros indicadores e índices.

6.1. Indicadores e índices propuestos por Groundwater Indicators Working Group (UNESCO, IAEA, IAH y UNECE)

En este apartado se recogen los indicadores e índices relacionados con la calidad propuestos por Groundwater Indicators Working Group en su último documento (Groundwater Indicators Working Group, 2003), resultado de las conclusiones de la reunión del grupo de trabajo realizada en Viena, junio 2003, en la que se modificaron los indicadores e índices propuestos en una reunión anterior realizada en Paris, enero 2002 (Groundwater Indicators Working Group, 2002). Se recoge, por tanto, la última versión de dichos indicadores e índices.

6.1.1. Indicador de calidad de las aguas

TIPO: Indicador de estado

DESCRIPCIÓN: Es un indicador propuesto conceptualmente sin cuantificar ni concretar.

Algunas variables químicas tales como el pH, la temperatura, la conductividad eléctrica, nitratos y cloruros, pueden indicar cambios de calidad del agua subterránea o problemas de contaminación, cuando son analizadas en un periodo regular.

Los indicadores de calidad del agua subterránea para abastecimiento tienen que basarse en una escala amplia de variables dentro de las normas para que el agua sea potable. También se deben establecer los indicadores específicos de calidad del agua subterránea para riego y usos industriales.

Los análisis químicos del agua subterránea se deben realizar cada cuatrimestre o al menos dos veces al año (durante el periodo de aguas altas y aguas bajas). Sin embargo, algunas variables (como temperatura, pH y conductividad eléctrica) se deben registrar más frecuentemente o incluso medirlas mediante instrumentación permanente de control.

Se pueden realizar estudios estadísticos siempre que los datos sean de un periodo largo de años (tres años o más), para indicar los problemas y los cambios de calidad del agua subterránea.

UTILIZACIÓN: Analizar y visualizar los problemas de calidad del agua subterránea en el espacio y el tiempo.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Propuesto teóricamente (Groundwater Indicators Working Group, 2003) pero sin cuantificar.

6.1.2. Indicador de usos del agua respecto al tratamiento

TIPO: Indicador de estado

DESCRIPCIÓN: Es una propuesta para definir si el agua es potable, o apta para otros usos (agricultura, industria, refrigeración) con o sin tratamiento.

Los tratamientos económicamente o técnicamente demandados incluyen procesos como desalinización, ósmosis inversa, membrana filtrante, filtrado normal, ajuste de pH por alcalinización, etc. Mientras que el resto no se consideran económicamente o

técnicamente demandados en la bibliografía consultada. Un tratamiento complejo incrementa los costes de suministro y mantenimiento del agua.

El indicador se divide en cuatro categorías según el tratamiento que requiera el agua:

- Apta para uso sin tratamiento.
- Necesita un tratamiento simple.
- Necesita tratamiento económicamente y tecnológicamente posible.
- Para que el agua alcance la calidad adecuada no existe un tratamiento posible desde el punto de vista tecnológico y económico.

UTILIZACIÓN: Definir si el agua es apta para el uso que se le quiere dar con o sin tratamiento.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Propuesto teóricamente (Groundwater Indicators Working Group, 2003) pero sin cuantificar.

6.2. Perfil de Calidad utilizado por el IGME

En este grupo se recogen una serie de índices e indicadores reunidos por el IGME, cuyo conjunto integran lo que se denomina Perfil de Calidad de un acuífero. Para su cálculo se utilizan los datos analíticos obtenidos en la red de calidad del IGME, que incluyen las características físico-químicas de las aguas subterráneas. Para comparar la calidad de aguas de diferente procedencia se consideran las normas de potabilidad de las aguas para consumo público.

Estos indicadores e índices que se definen a continuación se han utilizado para la realización de los informes de Coyuntura del Ministerio de Medio Ambiente.

6.2.1. Análisis de sulfatos

TIPO: Índice/ Indicador de estado

DESCRIPCIÓN: En este análisis se agrupan dos indicadores. En primer lugar se obtiene el contenido en sulfatos en un momento dado (a) y en segundo lugar se analiza su evolución a lo largo del tiempo obteniendo su tendencia (b).

a) Se establece el rango admisible de sulfatos entre 250 mg/l (máximo fijado por la Reglamentación Técnica-Sanitaria para el abastecimiento y control de la calidad de las aguas potables de consumo público) y 800 mg/l (máximo excepcional para aguas de abastecimiento público fijado por las autoridades autonómicas competentes).

Se cuantifica el contenido medio de sulfatos de cada unidad hidrogeológica. Se determina el número de unidades de cada cuenca que están en ese rango, inferior o superior, y se obtienen los porcentajes totales para todas las cuencas.

b) El cálculo e interpretación de la recta de regresión del contenido medio de sulfatos de cada unidad hidrogeológica y el análisis comparativo de la concentración de sulfatos en los últimos quince y cinco años, proporcionan la tendencia de los acuíferos, obteniendo el número unidades hidrogeológicas que aumentan, las que disminuyen y las que se mantienen estables.

UTILIZACIÓN: Obtener el número (o porcentaje) de UH que exceden la concentración de sulfatos permitida y la tendencia.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Aplicado en los informes de Coyuntura del Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM 1999, 2000)

6.2.2. Análisis de nitratos

TIPO: Índice/ Indicador de estado

DESCRIPCIÓN: En este análisis se agrupan dos indicadores. En primer lugar se obtiene el contenido en nitratos en un momento dado (a) y en segundo lugar se analiza su evolución a lo largo del tiempo obteniendo su tendencia (b).

a) El valor máximo admisible en las aguas para abastecimiento público se fija, según la reglamentación española y comunitaria en 50 mg/l . Para el índice se toma el intervalo comprendido entre 25 mg/l y 50 mg/l.

Se determina el número de unidades de cada cuenca que están en ese rango, inferior o superior, y se obtienen los porcentajes totales para todas las cuencas.

b) El cálculo e interpretación de la recta de regresión del contenido medio de nitratos de cada unidad hidrogeológica y el análisis comparativo de la concentración de nitratos en los últimos quince y cinco años, proporcionan la tendencia de los acuíferos, obteniendo el número unidades hidrogeológicas que aumentan, las que disminuyen y las que se mantienen estables.

UTILIZACIÓN: Evaluar el número de unidades hidrogeológicas que exceden la concentración de nitratos permitida y la tendencia.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Aplicado en los informes de Coyuntura del Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM 1999, 2000)

6.2.3. Análisis de cloruros

TIPO: Indicador de estado

DESCRIPCIÓN: El contenido en cloruros del agua del acuífero se controla mediante una red específica denominada red de intrusión (en España consta de 687 puntos distribuidos en 5 cuencas hidrográficas). Cada punto de muestreo tiene su serie histórica de medidas y se puede determinar estadísticamente la tendencia de la evolución de sus valores. Al no estar establecidos los límites en el contenido en cloruros por la reglamentación, no se efectúa el análisis de cantidad y sólo se considera la tendencia.

UTILIZACIÓN: Estudiar la tendencia del contenido en cloruros.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Aplicado en los informes de Coyuntura del Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM 1999, 2000)

6.2.4. Potabilidad de las aguas subterráneas

TIPO: Índice de estado

DESCRIPCIÓN: Relación de unidades hidrogeológicas de una cuenca hidrográfica cuya agua puede ser utilizada para abastecimiento público.

Calcula para cada unidad las características de potabilidad, obteniendo si cumple, cumple parcialmente o no cumple, la Reglamentación Técnica Sanitaria (RTS) para abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público, aprobada en el Real Decreto 1138/1990 de 14 de septiembre, y actualmente modificada por el Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano.

Su representación gráfica en un mapa permite distinguir mediante colores, las unidades hidrogeológicas que cumplen la RTS, las que cumplen parcialmente la RTS y las que sobrepasan los límites de la RTS. Dando también el porcentaje de las mismas que pertenece a cada grupo.

UTILIZACIÓN: Evaluar el agua potable disponible.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Aplicado en los informes de Coyuntura del Ministerio de Medio Ambiente (MIMAM 1999, 2000)

6.3. Otros indicadores e índices

En este último grupo se encuentran los indicadores e índices relacionados con la calidad que no pertenecen a ninguno de los dos grupos anteriores.

6.3.1. Índice particularizado de intrusión marina (IPI)

TIPO: Índice de estado

DESCRIPCIÓN:

Se divide el acuífero en i elementos

$$IPI_i = \sum_j a_j V_{i,j}$$

donde:

IPI_i , es el valor del IPI para el elemento i -ésimo

a_j , es el coeficiente de peso para la variable $V_{j-ésima}$

$V_{i,j}$, es el valor de la variable $V_{j-ésima}$ para el elemento i -ésimo

J , es el número de variables químicas que se evalúan

Al no disponer de datos suficientes, tan sólo se tienen en cuenta los datos de la red de intrusión: cloruros y conductividad. Pero dado que en la conductividad influyen también otros factores, sólo se tendrá en cuenta la concentración en cloruros, la cual está directamente relacionada con la intrusión marina.

$$IPI_i = 10 * \frac{\text{Log}(|Cl^-|_i) - \text{Log}(|Cl^-|_{\text{minimo}})}{\text{Log}(|Cl^-|_{\text{maximo}}) - \text{Log}(|Cl^-|_{\text{minimo}})}$$

$|Cl^-|_{\text{minimo}}$, es el mínimo registrado en el acuífero

$|Cl^-|_{\text{maximo}}$, es el correspondiente al agua del mar

En forma general:

$$IPI_i = A * (\text{Log}(|Cl^-|_i) - B)$$

con

$$A = \frac{10}{\text{Log}(|\text{Cl}^-|_{\text{máximo}}) - \text{Log}(|\text{Cl}^-|_{\text{mínimo}})}$$

$$B = \text{Log}(|\text{Cl}^-|_{\text{mínimo}})$$

Este índice oscilará entre 0 y 10, de forma que el valor nulo corresponderá a una concentración mínima, y el valor máximo al agua del mar.

UTILIZACIÓN: Evaluar el estado de **intrusión** marina en un acuífero costero.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Índice propuesto teóricamente por (Murillo J.M. y Navarro J. A., 1991) y aplicado al acuífero de la Plana de Castellón y en el acuífero costero de Motril-Salobreña (Navarro et al., 1995). Sin desarrollo posterior.

Existe también un índice generalizado de intrusión marina (Murillo J.M. y Navarro J. A., 1995) calculado a partir del anterior pero definiendo cuatro clases de profundidad para tratar el problema tridimensionalmente, por lo que requiere una mayor modelización matemática.

6.3.2. Acuíferos costeros salinizados por intrusión marina

TIPO: Índice de estado

DESCRIPCIÓN: Porcentaje de superficie de acuífero afectada por un contenido en cloruros superior a los 1000 mg/l (límite de utilización del agua para aprovechamiento urbano o uso agrícola) respecto a la superficie total de acuíferos costeros controlados (MIMAM, 1998).

$$\text{sup. salinizada} = \frac{\text{n}^\circ \text{ ptos. con niveles de cloruros superiores a } 1.000\text{mg/l}}{\text{n}^\circ \text{ puntos controlados}} \cdot \text{sup.UH}$$

El indicador se calcula para cada unidad hidrogeológica costera en que exista una red de control de la calidad del agua subterránea. El ámbito ocupa el litoral mediterráneo español (incluidas las Islas Baleares) y una parte del litoral atlántico (la costa andaluza).

Sólo se tienen en cuenta las unidades hidrogeológicas donde la red de control tiene una densidad superior a un punto por cada 150 km².

Para la determinación del índice a nivel de cuenca o de todo el territorio nacional se divide la suma de todas las superficies contaminadas de cada unidad entre la suma de la superficie total de la unidad y se lleva a términos porcentuales (x 100).

UTILIZACIÓN: Evaluar la extensión del área salinizada.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Estudio teórico en (MIMAM, 1998), donde los datos utilizados proceden de la Red de Control de la Calidad del Agua Subterránea y Red Específica de Control de la Intrusión Marina del Instituto Geológico Minero de España.

6.3.3. Acuíferos contaminados por nitratos

TIPO: Índice de estado

DESCRIPCIÓN: Porcentaje de superficie de acuífero afectada por un contenido en nitratos superior a 50 mg/L (límite para la potabilidad del agua establecido por la reglamentación) respecto a la extensión total de los acuíferos controlados (MIMAM, 1998).

$$\text{sup. contaminada} = \frac{\text{n}^\circ \text{ptos. con concentración de nitratos superior a 50mg/l}}{\text{n}^\circ \text{puntos controlados}} \cdot \text{sup.UH}$$

Sólo se tienen en cuenta las unidades hidrogeológicas donde la red de control tiene una densidad superior a un punto por cada 150 km².

Para la determinación del índice a nivel de cuenca o de todo el territorio nacional se divide la suma de todas las superficies contaminadas de cada unidad hidrogeológica entre la suma de la superficie total de la unidad y se lleva a términos porcentuales (x100).

UTILIZACIÓN: Para cada unidad hidrogeológica controlada se evalúa la superficie afectada por contaminación de nitratos.

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Estudio teórico en (MIMAM, 1998), donde los datos utilizados se derivan de dos mediciones anuales en las unidades hidrogeológicas más importantes del territorio español. Sin desarrollo posterior.

También fue definido anteriormente de forma general por La Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA, 1995).

6.3.4. Características de calidad

TIPO: Indicador de estado

DESCRIPCIÓN: Estudio de la calidad del agua mediante:

- Facies hidroquímica. Indica el tipo de agua mediante la representación en el diagrama de Piper-Hill-Langelier.
- Potabilidad. Se analizan los siguientes parámetros: conductividad, nitratos, nitritos, sulfatos, cloruros, sodio, potasio, magnesio y amonio; que cumplen la Reglamentación Técnica Sanitaria (RTS) para abastecimiento y control de las aguas potables de consumo público, R.D. 1138/1990 (actualizado por R.D. 140/2003). Se realiza un diagrama de potabilidad.
- Representación cartográfica. Se distinguen mediante colores los puntos que cumplen la RTS, los que no la cumplen y los que no tienen datos.

UTILIZACIÓN: Informar sobre la **calidad** del agua subterránea

NIVEL DE IMPLANTACIÓN: Utilizado en los informes relativos a las aguas subterráneas de la cuenca del Júcar (Pernía et al., 2000). Es una propuesta teórica no completada.

7. CUADRO RESUMEN

A continuación se presenta un cuadro con los indicadores e índices recogidos en el documento.

CUADRO DE INDICADORES E ÍNDICES					
	Indicador o índice		Utilización	Tipo *	
Cantidad	GIWG	Recursos de agua por habitante	Groundwater Indicators Working Group, 2003	Estado	
		Recarga AS/Extracción AS		Presión	
		Extracción AS/Recursos explotables		Presión	
		Agua sup./AS usada para beber		Estado	
		Indicador del agotamiento del agua		Estado	
		Recursos renovables extraídos		Presión	
	Perfil de Llenado	Evol. gráfica de los niveles		Genérica	Estado
		Tendencias en los niveles		IGME y DGOH, 1995	Estado
		Evol. anual entre máx. y mín.		IGME (MIMAM 1999,2000)	Estado
		Índice de llenado		IGME, 2000	Estado
		Representaciones cartográficas		IGME y CHJ, 2000	Estado
	Índice de estado		CHJ, 2000	Estado	
	Índice de llenado (volúmenes)		Pernía y Doblás, 1997	Estado	
	Estado de sobreexplotación		López Camacho et al., 1991	Presión	
	Intensidad del uso del agua		MIMAM, 1998	Presión	
	Perfil de sequía		Vazquez M. et al., 2001	Estado	
	Uso urbano de recursos subterráneos		Pernía, Maj-Britt et al., 1999	Estado	
Calidad	GIWG	Indicador de calidad de las aguas	Groundwater Indicators Working Group,2003	Estado	
		Usos del agua respecto al tratamiento		Estado	
	Perfil de Calidad	Análisis de sulfatos		IGME para el Informe Coyuntura (MIMAM, 1999 y 2000)	Estado
		Análisis de nitratos			Estado
		Análisis de cloruros			Estado
		Potabilidad de las aguas subterráneas			Estado
	Índice particularizado de intrusión marina		Murillo J.M. y Navarro J.A.	Estado	
	Acuíferos costeros salinizados		MIMAM, 1998	Estado	
	Acuíferos contaminados por nitratos			Estado	
	Características de calidad		CHJ e IGME, 2000	Estado	

*Clasificación realizada por los autores del presente documento

8. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES PARA EL DESARROLLO FUTURO DE INDICADORES DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Al iniciar el presente trabajo se pretendía analizar los indicadores empleados hasta el momento en España, compararlos con los empleados en otros países y continuar con la línea emprendida para definir nuevos indicadores que se incluirán en los perfiles de llenado y de calidad. Este planteamiento tiene como objetivo conocer el estado de los acuíferos y compararlos a nivel nacional. Parte de una situación favorable debido a la existencia de unas redes de control del IGME, series históricas completas de datos y la nueva implantación de una red de control oficial.

Al incorporar en este documento los indicadores de cantidad y calidad para el agua subterránea del Grounwater Indicators Working Group, se observa que algunos se plantean dando las pautas a seguir, sin desarrollar ninguna fórmula concreta. Su objetivo es comparar el estado de los acuíferos, tanto a nivel nacional como internacional.

El principal problema radica en que los datos varían de unas regiones a otras, incluso dentro de un mismo país, por lo que es necesario homogeneizar las escalas temporal y espacial. Groundwater Indicators Working Group propone que esta tarea se inicie recopilando los datos que existen, incluyendo la calidad de los mismos y los datos de los que no se dispone, definir cuáles son los datos más relevantes y crear una base de datos y una herramienta de integración, proceso y evaluación de los mismos. Se propone que en los países donde no existan datos relevantes, se empleen estimaciones adecuadas para aplicar los indicadores.

Las conclusiones que se obtienen al analizar todos los indicadores coinciden en gran parte con las obtenidas por Groundwater Indicators Working Group, ya que *los indicadores propuestos son robustos científicamente y políticamente relevantes, basados en datos medibles y observables, informan sobre el estado actual, tendencias e impacto sobre los recursos de aguas subterráneas. Estos indicadores también reflejan*

aspectos sociales, económicos y medioambientales del desarrollo de los recursos de aguas subterránea y su protección con respecto a los usos del suelo.

El desarrollo de indicadores es un proceso de aproximación científico para presentar datos sobre aspectos importantes del agua subterránea e informar a distintos usuarios de forma sencilla y entendible. Sin embargo, la limitación que se tiene en los datos de aguas subterráneas, es el principal problema que se presenta a la hora de obtener indicadores.

Los programas de control del agua subterránea están menos desarrollados que los del agua superficial. En particular, los programas de control de calidad nacional de aguas subterráneas están operativos en muy pocos países, por lo que los datos de calidad son escasos. Otro problema es que la forma de medir no está estandarizada, por lo que los datos no son comparables. Los pozos se perforan para distintos objetivos, de forma que a veces el diseño no es adecuado para el control y por tanto, no se pueden incluir en la red de control. El bajo número de datos de aguas subterráneas refleja el bajo conocimiento hidrogeológico de muchos acuíferos nacionales y fronterizos y afecta a la gestión de los recursos existentes.

Hay una gran dependencia entre las bases de datos existentes y los indicadores, llegando al punto de que sólo se pueden desarrollar indicadores con los datos disponibles, lo que refuerza la existencia de dichos datos. La disponibilidad de los datos varía significativamente entre los países y regiones.

El esfuerzo se debe centrar en crear una red de control nacional de agua subterránea que permita alcanzar valores comparables internacionalmente tanto de calidad como de cantidad. Sin embargo, esto requiere una unificación de esfuerzos de los organismos implicados y un coste nacional.

Se destacan en sus conclusiones los dos puntos siguientes:

- *La formulación de algunos de los indicadores tiene cierta incertidumbre. Principalmente proviene de la escasez de datos y la limitación en el conocimiento de los sistemas de aguas subterráneas. En muchos acuíferos nacionales y acuíferos fronterizos no se dispone de datos y hay que estimarlos. Algunos análisis pueden ayudar a identificar qué datos pueden ser observados y qué métodos de control se pueden aplicar para que la medida sea lo más estándar posible y se pueda comparar. Establecer y mejorar las redes de control permitirá poder calcular indicadores más precisos. Groundwater Indicators Working Group recomienda empezar a aplicar los indicadores incluso aunque en el momento presente sea necesario estimar algunas de las variables.*
- *No es urgente aplicar todos los indicadores en este momento. En los países donde los datos no son suficientes ni siquiera para realizar una estimación, se deberá retrasar su aplicación, estudiando en primer lugar la implantación de redes de control, de forma que se disponga de la base de datos necesaria con la que poder construir los indicadores.*

Como planteamiento para un desarrollo futuro se manifiesta que al analizar los indicadores e índices de cantidad de la bibliografía consultada, sólo están en uso o se han utilizado en más ocasiones además de la teórica, los indicadores que componen lo que se ha denominado **Perfil de Llenado** de un acuífero. En un futuro se pretende seguir en esa línea, haciendo un estudio temporal estadístico de dichos indicadores, de manera que se pueda analizar y predecir el estado de explotación de un acuífero. Asimismo se pretende obtener el perfil de llenado global de un acuífero a partir de los perfiles de llenado de los puntos de control, pues aunque dichos indicadores son puntuales, proporcionan datos que pueden ser extrapolados matemáticamente para dar una visión global.

En cuanto a los indicadores e índices relacionados con la calidad, actualmente están parcialmente en uso los indicadores e índices que se han recogido dentro del **Perfil de Calidad**. Éste no está totalmente desarrollado, por lo que debe continuarse el trabajo en este campo, de manera similar a como se ha efectuado en los aspectos de cantidad.

El análisis y comparación de los perfiles relacionados con la cantidad de los recursos y la calidad del agua subterránea, definirá el **Estado del Acuífero**, no considerándose correcta la separación de ambos conceptos.

9. REFERENCIAS

AEMA, 1995. Guidelines for data collection for the Dobris +3 Report. Agencia Europea de Medio Ambiente. Copenhague.

Cabrera M. E., Cobacho R., Almandoz J, Cabrera R. E., Arregui de la Cruz F., 2002. La gestión del agua en los países de la Unión Europea: paradigmas del norte y del sur. III Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del agua, Sevilla, 13-17 de noviembre.

Calot G. 1974, Curso de estadística descriptiva (Capítulo 9), Paraninfo. ISBN: 84-283-0563-3.

Chacón E., 1965. Curso breve de estadística (Capítulo 6). Publicaciones de la Universidad de Deusto, Bilbao. Núm. De registro: BI. 24-1965.

CHJ, 2001 y 2002. Informe de seguimiento del índice de estado de la red básica de piezometría en el ámbito territorial de la confederación. Oficina de Planificación Hidrológica.

Fidalgo A., Carceller T., Arqued V.M. 2002. Un indicador del estado cuantitativo de las aguas subterráneas. Jornadas sobre presente y futuro del agua subterránea en España y la directiva marco europea, pp.393-399.

Groundwater indicators Working Group: UNESCO, IAH e IAEA, 2002. Groundwater resources sustainability indicators. (Draft Document, Paris).

Groundwater indicators Working Group: UNESCO, IAEA, IAH y UNECE, 2003. Development of groundwater indicators for second edition of the World Water Development Report. (Draft Document, Viena).

IGME y DGOH, 1995. Metodología de los informes semestrales de las redes de control de las aguas subterráneas.

López- Camacho B., Sánchez A. Y Batlle A., 1991. Unidades hidrogeológicas con problemas o riesgos de sobreexplotación (territorio peninsular e islas Baleares). XXIII Congreso Internacional IAH, Puerto de la Cruz, Tenerife. ISBN: 84-404-9132-6, pp.539-544.

MIMAM, 1996. Indicadores Ambientales. Una propuesta para España. Serie monografías. I.S.B.N.:84-498-0244-X.

MIMAM, 1998. Sistema español de indicadores ambientales: subáreas de agua y suelo. Serie monografías. I.S.B.N.:84-8320-064-3.

MIMAM, 1999 y 2000. Informe de Coyuntura de Ministerio de Medio Ambiente. Publicación mensual. I.S.S.N.:1139-7950.

MINER, 1994. Libro blanco de las aguas subterráneas. Serie monografías. ISBN: 84-498-0050-1.

Murillo J.M. y Navarro J. A., 1991. Modelo para el cálculo de un índice del estado de intrusión de un acuífero costero. Aplicación a la plana de Castellón. IGME.

Navarro J.A., Gavilán C.J., Ortega R., 1995. Método para el cálculo de un índice del estado de intrusión en acuíferos costeros (IEI).

OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico), 1994. OCDE Environmental Indicators. OCDE. Paris.

Pernía J.M., Doblas J.G. 1997. Metodología para el cálculo de un índice de llenado de los acuíferos. IGME, 18p.

Pernía J.M., Corral M.M, Sánchez J. y Sanz L., 1998. Boletín de Información Hidrogeológica. Niveles y variación de reservas hídricas de los acuíferos. IGME.

Pernía J.M., Maj-Britt L.A., ESTRAÍNSA y ECODESARROLLO, 1999. Prioridades para la implantación de los perímetros de protección de las captaciones de aguas subterráneas en la comunidad Valenciana. Protección del abastecimiento urbano en la comunidad valenciana. IGME y Consejería de Medio Ambiente, Generalitat Valenciana.

Pernía J.M., Maj-Britt L.A., ESTRAÍNSA y ECODESARROLLO, 1999. Criterios para calcular los perímetros de las captaciones de aguas subterráneas en la comunidad Valenciana. Protección del abastecimiento urbano en la comunidad valenciana. IGME y Consejería de Medio Ambiente, Generalitat Valenciana.

Pernía J.M., Corral M.M. 2000. Llenado de los acuíferos. Propuesta de un indicador. V Congreso Geológico de España. Alicante. Geotemas volumen 2: 111-114.

Pernía J.M., Ferrer F.J., Corral M.M., López J., García O., Serrano F., Mejías M. 2000. Redes de control "C.H.J. 2000" de las Aguas Subterráneas en la Cuenca del Júcar. Evoluciones piezométricas y situación de las aguas subterráneas en el mes de mayo. IGME- CHJ.

Pernía J.M., Ferrer F.J., Corral M.M., López J., García O., Serrano F., Mejías M., Abolafia de Llanos M. 2000. Redes de control "C.H.J. 2000" de las Aguas Subterráneas en la Cuenca del Júcar. Llenado de los acuíferos y calidad de las aguas subterráneas. IGME- CHJ.

Pernía J.M., Corral M.M. 2001. Análisis del llenado de los acuíferos en función de diferentes periodos históricos de referencia. VII Simposio de Hidrogeología, Asociación Española de Hidrología Subterránea. Murcia.

Shiklomanov, I. 1991. The World Water Resources. In: International Symposium to commemorate the 25 years of IHD/IHP: 93-126. UNESCO.

UNESCO-WWAP, 2003. Water for People, Water for Life. The United Nations World Water Development Report.

Vázquez M., Ortega R. y Luque J.A., 2001. Impacto de la sequía en los acuíferos de Andalucía. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía e Instituto Geológico Minero de España. Tomo I, II y III.

Vázquez M., Antón C., Moreno M., Luque J.A. y Martín M., Gestión ambiental de las aguas subterráneas: impacto de la sequía en los acuíferos vinculados a espacios naturales protegidos de Andalucía.

WEF: World Economic Forum (2002): Environmental Sustainability Index (<http://www.ciesin.columbia.edu/indicators/ESI>). Yale Center for Environmental Law and Policy. February 2002.