

Aplicación de modelo para gestión ambiental de aguas subterráneas en la cuenca Holguín

Sara Fernández Cruz

Esp. Ambiental. Prof. Auxiliar. Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales y Tecnológicos (CISAT). CITMA. Holguín. Cuba.

e-mail: sara@cisat.cu

Elena Fornet Hernández

Inv. Titular. Dra. C. Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales y Tecnológicos (CISAT).

e-mail: efornet@cisat.cu

RESUMEN

La gestión ambiental de las aguas subterráneas, en los diferentes contextos geográficos a través del tiempo, se ha focalizado de forma puntual a la protección de las fuentes de abasto contra la contaminación y el agotamiento, sin considerar suficientemente la incidencia de la cuenca hidrográfica. Con el objetivo de suplir estas insuficiencias, se diseñó el modelo GAIAS, para la gestión ambiental integral de las aguas subterráneas, cuya validación se complementa con su implementación en la cuenca Holguín como caso de estudio, obteniéndose resultados positivos, que se revelan a través del índice de sostenibilidad ambiental del agua en la cuenca (ISAAC), calculados sobre la base de las observaciones de los indicadores ambientales de estado, presión y respuesta, en correspondencia con las funciones hidrológica, ambiental y socioeconómica propias de la cuenca.

Palabras clave: aguas subterráneas, cuenca hidrográfica, gestión ambiental, modelo GAIAS.

Application of model for environmental management of groundwater in Holguín basin

ABSTRACT

Environmental management of groundwater in different geographical contexts along time, have been pointly focused to the protection of supply sources against contamination and exhaustion without enough consideration to the influence of its hydrographical basin. With the objective of overcoming these inadequacies GAIAS model was designed for the integral environmental management of groundwater. Its validation is supplemented with its implementation in Holguín basin as a case study, obtaining positive results that are revealed through the index of environmental sustainability of the water in the basin (ISAAC), calculated on the basis of observations of the environmental indicators of state, pressure and response, in correspondence with the hydrological, environmental and socioeconomic functions of the basin.

Keywords: environmental management, GAIAS model, groundwater, hydrographical basin.

INTRODUCCIÓN

Históricamente el hombre se ha visto en la necesidad de buscar diferentes formas de gestionar el agua, siempre considerando y adaptándose a las condiciones de manifestación de este recurso en la naturaleza y en el contexto social de su desarrollo. Este planteamiento es reafirmado por Boudru y Bernard (2005), al plantear que “la gestión de las aguas se ha vinculado a las condiciones geográficas y sociológicas de los territorios”.

Según apunta López-Camacho (2002), un tercio de la población mundial se abastece de los acuíferos subterráneos y en muchos lugares constituyen la principal o incluso la única fuente de agua de la población rural. El hecho de que las aguas subterráneas presentan características especiales que le infieren ventajas para su gestión, ha conllevado a un creciente aumento de su explotación, máxime cuando la demanda del recurso se incrementa con el desarrollo industrial y el aumento de la población mundial. Estas características están dadas por la amplia distribución espacial de las formaciones geológicas consideradas acuíferas, el bajo costo de la inversión de explotación, e independencia en la operación de las fuentes (explotación controlada).

Todos estos planteamientos resaltan el gran significado social, económico y ambiental que presenta el agua subterránea. No obstante, la escasez de agua y la mala calidad de la misma manifestada en todos los niveles territoriales, denota la insuficiencia de los modelos de gestión prevalecientes en la actualidad. Esto repercute negativamente en lo referente a la calidad de vida de la población y al estado higiénico sanitario del entorno, con el incremento de las enfermedades de transmisión hídricas y el deterioro de las condiciones medioambientales.

La gestión ambiental de las aguas subterráneas desarrollada en los diferentes contextos territoriales se ha focalizado de forma muy puntual a la protección de las fuentes de abasto contra la contaminación y el agotamiento, enmarcándose en la adopción de una serie de medidas acorde con las características hidrogeológicas e higiénico-sanitarias de la zona de su ubicación. Estas medidas van desde las más sencillas como es la explotación con regulación de caudal, hasta las de mayor complejidad que requieren de la construcción de obras de ingeniería. Pero en ninguno de los casos se contempla suficientemente la incidencia de la cuenca hidrográfica en la gestión ambiental de las aguas subterráneas, es decir no se visualiza el papel que juega la cuenca hidrográfica como escenario o ámbito de gestión, obviando su carácter integrador y funcional en el ciclo hidrológico.

Ante esta situación y en aras de fomentar la labor de la gestión ambiental de las aguas subterráneas con enfoque de cuenca como sistema, fue diseñado por Fernández (2011) el modelo GAIAS (Gestión Ambiental Integral de las Aguas Subterráneas), como una estrategia para establecer nuevas metas con vista a garantizar la sostenibilidad de este recurso.

En el presente trabajo se muestran los resultados de mayor relevancia obtenidos a partir de la aplicación de dicho modelo en la cuenca Holguín, la cual se tomó como caso de estudio. En este territorio, la sobreexplotación de los acuíferos y la contaminación de las aguas subterráneas son los principales problemas que afectan su aprovechamiento. Esta situación es resaltada en el diagnóstico ambiental realizado con anterioridad en dicha cuenca (Fernández 2005), en el que se señala además, que esta problemática se torna crítica en dicha cuenca, al existir aspectos físicos desfavorables que inciden negativamente en su comportamiento hídrico natural.

Tales razones evidencian la necesidad de gestionar ambientalmente las aguas subterráneas, con vista a promover su uso racional, prolongar el abastecimiento y su calidad en este contexto, ya que constituyen la fuente de abasto total o parcial del 80% de la población asentada en áreas de la cuenca Holguín, incluyendo numerosos sectores industriales y de servicios. Por lo que la carencia de este recurso tiene una gran repercusión, en las condiciones económicas, sociales y ambientales de dicho territorio.

EL MODELO GAIAS

A nivel internacional se ha trabajado en la incorporación de la concepción de la *integralidad en la gestión de los recursos hídricos*, como pauta a seguir para la gestión ambiental de los recursos hídricos en general. Sobre la base de estos criterios fue diseñado el modelo GAIAS (Fernández 2011), como herramienta para gestionar ambientalmente las aguas subterráneas, cuyo sustento teórico estuvo fundamentado en tres concepciones: la gestión ambiental, el manejo integral de los recursos hídricos (MIRH) y la cuenca hidrográfica como escenario de gestión.

Su aporte fundamental radica precisamente en la consideración de la *cuenca hidrográfica como ámbito de gestión de las aguas subterráneas*. Se basa en la integralidad física natural manifestada en la cuenca hidrográfica y su funcionamiento como un sistema, ya que en ella se interrelacionan elementos tanto del ciclo hidrológico, como físico-geográficos y antrópicos, es decir, en ella se genera, almacena y explota el recurso. A su vez se define a la gestión ambiental integral de las aguas subterráneas como “la protección del recurso con miras a un aprovechamiento sustentable a través de una integralidad física, administrativa, tecnológica y social” (Fernández 2011).

Existen criterios que fundamentan la gestión ambiental integral con enfoque de cuencas como sistema. Según Peña (2005), la cuenca constituye un sistema por las siguientes razones:

- Existen *entradas y salidas*: el ciclo hidrológico del agua permite cuantificar que a la cuenca ingresa una cantidad de agua por medio de la precipitación y otras formas y luego existe una cantidad que sale de la cuenca por medio de un río principal o por el uso que se le da al agua, ya sea para consumo humano, industrial o agrícola.
- En la cuenca se producen *interacciones* entre sus elementos: ejemplo, si se deforesta irracionalmente en la parte alta, es posible que en épocas lluviosas se produzcan inundaciones en las partes bajas.
- En la cuenca existen *interrelaciones*: ejemplo, la degradación de un recurso como el agua, está en relación con la falta de educación ambiental, la falta de aplicación de leyes, con las tecnologías, etc.
- El sistema de la cuenca a su vez está *integrada por los subsistemas* siguientes:
 - Biológico*: integrado esencialmente por la flora y la fauna y los elementos cultivados por el hombre.
 - Físico*: integrado por el suelo, geología, recursos hídricos y clima (temperatura, radiación, evaporación, etc.).
 - Económico*: integrado por todas las actividades productivas que realiza el hombre en la agricultura, recursos naturales, industria, servicios (camino, carreteras, energía, asentamientos y ciudades).

Social: integrado por todos los elementos demográficos, instituciones, tenencia de tierra, salud, educación, vivienda, culturales, políticos, etc.

El modelo está conformado por nueve elementos, cuya selección y aprobación fue sometida a criterio de expertos, a través de la aplicación del método “Delphi” (González 2005) sobre la base de tres dimensiones evaluativas: Aplicabilidad, Eficiencia y Pertinencia. Finalmente resultaron como conformadores del modelo los siguientes elementos: Base de información gráfica, Instrumentos regulatorios, Marco institucional, Actores, Ámbito de gestión (escenario), Comunicación, Monitoreo o Seguimiento, Programa de manejo y Educación ambiental.

Clasifica como un modelo de mejora continua, flexible, participativo y proactivo, ya que constituye un proceso recurrente de optimización; facilita y promueve la introducción de cambios en sistemas productivos y patrones de consumo con énfasis en la prevención; además de fomentar la participación social en el diseño y ejecución de estrategias y acciones definidas con este fin.

Descripción de las interrelaciones entre los elementos conformadores del modelo GAIAS.

La efectividad del modelo radica en las funciones propias de cada uno de los elementos que lo conforman y sus interrelaciones. La *base de información gráfica*, representada por el mapa de gestión ambiental de las aguas subterráneas muestra una zonificación del *ámbito de gestión*. La cual permite al *marco institucional* (las instituciones rectoras del modelo), establecer los diferentes niveles y prioridades para la gestión de las aguas subterráneas y sobre esta base, valorar, diseñar y estipular los diferentes *instrumentos regulatorios* (regulaciones administrativas, técnicas, jurídicas y políticas). Así como diseñar los programas de *educación ambiental* dirigidos a los diferentes *actores* (población e instituciones). Tanto los instrumentos regulatorios, como los programas de educación ambiental constituyen elementos esenciales del *programa de manejo*, que es el documento rector que establece las pautas para implementar el modelo.

Los *actores* son los encargados de ejecutar las acciones propias derivadas del modelo. De modo que resulta primordial la existencia de una *comunicación* fluida tanto del marco institucional con los actores, como entre estos, para facilitar el buen funcionamiento del modelo.

El *monitoreo o seguimiento* es un instrumento clave, a través del cual el marco institucional controla y supervisa el cumplimiento del programa de manejo, así como los resultados alcanzados con la implementación del modelo de Gestión ambiental integral de las aguas subterráneas GAIAS.

APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO GAIAS EN LA CUENCA HOLGUÍN

La validación del modelo GAIAS se realizó a partir de su aplicación en la cuenca hidrográfica Holguín como caso de estudio. Los resultados son valorados a partir del comportamiento del índice de sostenibilidad ambiental del agua en la cuenca (ISAAC), fundamentado en las observaciones de los indicadores ambientales de estado, presión y respuesta, en correspondencia con la función hidrológica, ambiental y socioeconómica propia de la cuenca.

La metodología para la implementación del modelo está estructurada en cuatro etapas: Conceptualización y contextualización, Diagnóstico, Planificación e implementación y Seguimiento y evaluación. Es válida para ser aplicada en cuencas pequeñas con un intercambio hidráulico definido, es decir, cuando exista correspondencia de la escorrentía superficial y subterránea. Particularizando en las características físico-naturales propias de la cuenca en cuestión, en correspondencia a la heterogeneidad del contexto geográfico del cual forma parte.

Etapa I: Conceptualización y contextualización

Como primer paso para su aplicación, se presentó el modelo GAIAS en el Consejo Territorial de Cuencas Hidrográficas (CTCH) y se hizo una explicación de todos los aspectos concernientes al mismo. Como son, sus objetivos, estructura y funcionamiento de cada uno de los elementos que lo conforman. Además se valoró la pertinencia y correspondencia del mismo con las funciones y objetivos del CTCH y se acordó la realización conjunta de acciones propias del modelo.

Luego de un análisis y valoración de las prioridades y necesidades del territorio holguinero, en concordancia con las condiciones físicas, sociales y económicas y los objetivos del modelo, se tomó para su implementación a la cuenca hidrográfica Holguín. Esta cuenca, en este sentido, presenta condiciones que propician la implementación del modelo GAIAS, que se traducen en sus características físico-geográficas, la elevada actividad antrópica y una desarrollada estructura social y organizacional, lo cual quedó demostrado en la aplicación de una matriz DAFO. Una vez concluida esta etapa se procedió al Diagnóstico.

Etapa II: Diagnóstico

En esta etapa se realizó una caracterización general de la cuenca sobre la base de la compilación de la información existente, levantamiento en el área de estudio, así como la identificación y evaluación de impactos, cuyos efectos ambientales asociados al medio natural son consecuencia de las acciones que forman parte de proyectos y/o actuaciones humanas.

La cuenca del río Holguín se ubica en el municipio del mismo nombre, ocupando un área de 96,0 km² y abarca las corrientes fluviales Jigüe, Marañón y Mayabe. Esta es un área densamente poblada, ya que en ella existen numerosos asentamientos poblacionales, entre los que se destaca la ciudad de Holguín, cuya población asciende a unos 254 350 habitantes. Según PGOU-grupo de autores (2000) solamente el 39.3% de esta población cuenta con redes de alcantarillado y el 47,6 % con acueducto, lo que implica que exista una gran presión al medio natural, sobre todo a los recursos hídricos.

Esta situación se evidenció en la caracterización realizada a la cuenca, la cual incluyó elementos del medio físico y socioeconómico (tanto abióticos como bióticos y antrópicos). En la identificación, caracterización y evaluación de los impactos ambientales, se utilizó la metodología de Yvonnet (1998), en la que se hace una clasificación de los impactos en cuanto a: críticos, severos, moderados y compatibles. Como resultado se obtuvo, que el factor del medio más afectado desde el punto de vista del carácter agresivo de los impactos que recibe es *el agua*, con un total de 19 impactos: 12 de ellos críticos, 5 severos y 2 moderados.

Una vez identificado y evaluado que el recurso agua es el que recibe el mayor número de impactos críticos, se aplicó el esquema conocido como *DPSIR* de la Agencia Europea de Medio Ambiente (Del Río 2002), figura 1. En este esquema las fuerzas impulsoras (driving forces), generan presiones (pressures) sobre el agua que afectan su estado (state) y son causantes potenciales de un impacto (impact). Las respuestas (responses) incluyen las medidas y políticas para reducir las presiones y de esta manera mejorar el estado y reducir el impacto.

De esta forma se facilita la identificación de los aspectos que inciden negativamente sobre el agua específicamente, así como la definición de los indicadores ambientales de Estado, Presión y Respuesta para su posterior seguimiento y evaluación.

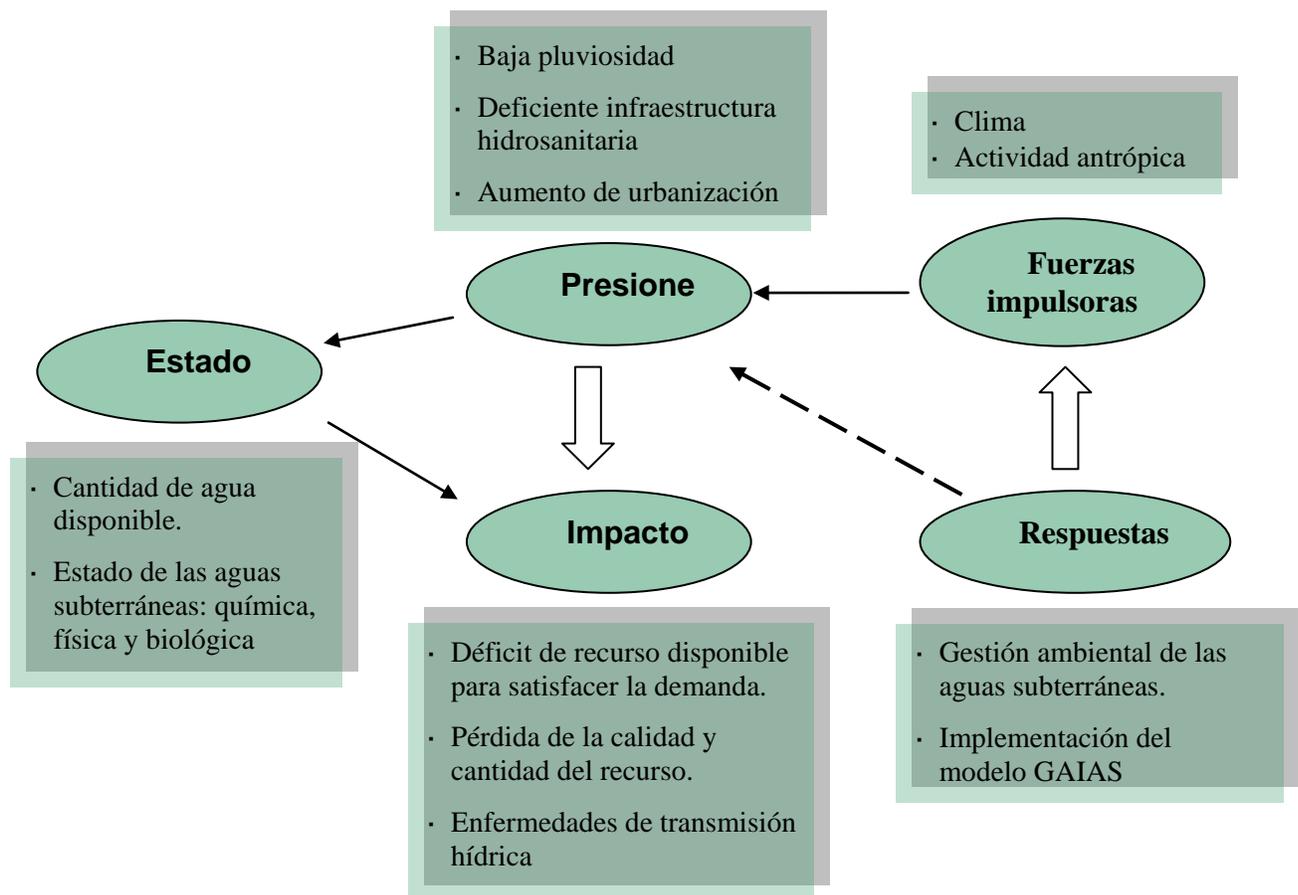


FIGURA 1. Esquema DPSIR (Agencia Europea de Medio Ambiente)

Como vía efectiva para contrarrestar las consecuencias negativas de los impactos, se procedió a la planificación e implementación del modelo GAIAS correspondiente a la etapa III.

Etapa III: Planificación e implementación

En esta etapa, como primer paso, se procedió a la confección de una *base informativa gráfica*, como herramienta indispensable en las investigaciones de las aguas subterráneas. En ella se

mostraron los elementos físico-naturales y antrópicos representativos del estado real del recurso en el contexto de la cuenca Holguín. Esta base estuvo representada por el *mapa de gestión ambiental de las aguas subterráneas*, obtenido del análisis de los mapas temáticos de la zona, como son: mapa de hidroisohipsas, mapa geológico, mapa de las zonas de agrietamiento y zonas de acumulación y mapa de los focos contaminantes.

En el *mapa de gestión ambiental de las aguas subterráneas* resultante, se diferenciaron tres zonas de gestión acorde con la homogeneidad de las características hidrogeológicas y socioeconómicas existentes, a su vez se diferenciaron tres niveles de gestión y cuatro categorías jerarquizadas en cuanto a las prioridades de gestión. En este sentido tuvo un gran peso la consideración de la presión antrópica ejercida y la vulnerabilidad de las zonas a la hora de definir estas prioridades, las cuales estuvieron relacionadas con: la protección de las zonas de recarga del acuífero, la limitación de las construcciones civiles y arquitectónicas, el tratamiento de residuales líquidos y los residuales industriales.

El segundo paso fue la elaboración y aplicación del *programa de manejo* para la cuenca, que contó con el siguiente orden de jerarquización:

- a) Se definieron las instituciones de mayor incidencia en la cuenca como grandes consumidoras o contaminadoras.
- b) De acuerdo con los focos contaminantes controlados, se rediseñó y aplicó un plan de medidas para la reducción de la carga contaminante.
- c) Se les dio a conocer a las instituciones rectoras del modelo las especificidades comprendidas en los instrumentos regulatorios: técnicas, administrativas, jurídicas y políticas.
- d) Se consideró a la ciudad de Holguín como núcleo poblacional de mayor incidencia sobre la cuenca, y al Consejo Popular de Pueblo Nuevo como localidad de fuertes problemas con respecto al recurso agua, ya que se detectaron altos índices de enfermedades de transmisión hídrica, fuentes contaminadas, áreas sin cobertura de redes de acueducto y alcantarillado y otros, que denotaron la necesidad de la implementación de un programa de educación ambiental.

Para llevar a cabo este último objetivo se diseñó e implementó una estrategia de comunicación educativa (Pérez 2009), con el objetivo de fomentar un cambio de conducta y adopción de buenas prácticas a través de la creación de hábitos y habilidades en los diferentes sectores de la población. Esta estrategia de comunicación tuvo un impacto positivo en la población, reflejándose en los indicadores ambientales de respuesta. Es preciso destacar que los problemas relacionados con las aguas subterráneas detectados en el diagnóstico realizado, tienen su origen en la actividad antrópica y son consecuencia de la inconciencia y falta de conocimientos de la población en esta temática.

Esto significa que un cambio de conducta con respecto al agua es imprescindible y el éxito del “cambio” que se plantea, radica precisamente en los cambios que deben producirse en la manera de pensar y actuar, por lo que el “factor humano” constituye el elemento clave y esto implica comunicación, discusión de las ideas y actuación humana. En estos términos la educación en todos los sentidos jugó un papel primordial, sobre todo la educación ambiental con énfasis en la protección y uso racional de las aguas subterráneas.

Etapa IV: Seguimiento y evaluación

De esencial importancia se considera esta etapa, en la que especialistas del CITMA monitorearon la eficiencia y eficacia de la implementación del modelo, identificando logros y debilidades a través de los *indicadores ambientales de estado, presión y respuesta*, seleccionados acorde con el SNMA (Sistema Nacional de Monitoreo Ambiental), resolución 111 del CITMA (2002).

EL SNMA se compone de un conjunto de variables ambientales seleccionadas, entendiendo como tal, determinados elementos cualitativos del medio ambiente susceptibles de ser medidos u observados, captados, almacenados, procesados y evaluados. Su función es la de ofrecer comparativamente una visión del estado del medio ambiente de un territorio, en un entorno de tiempo, evaluando las principales tendencias de su comportamiento, tanto cualitativas como cuantitativas.

Los indicadores ambientales de *Estado*, permitieron la medición de las características físico-bióticas existentes en el área de la cuenca. Los de *Presión*, permitieron cuantificar la intensidad de la intervención humana o natural sobre los ecosistemas existentes en el área de la cuenca y los de *Respuesta*, permitieron cuantificar las acciones sociales de corrección de la presión o del deterioro ambiental en la cuenca. La conjugación de estos indicadores muestra el resultado del nivel de desempeño ambiental de las aguas en la cuenca, que se visualizan a través de los índices de calidad y cantidad de las aguas superficiales y subterráneas, caudal ecológico, salud y ordenamiento territorial, así como biodiversidad y endemismos. Todos obtenidos a partir de las expresiones (3), (4), (6), (7), (9), (10) y (11).

La evaluación de la efectividad de la implementación del modelo se realizó a partir del cálculo del Índice de Sostenibilidad del Agua en la Cuenca (ISAAC), según la metodología propuesta por Fonseca (2005), la cual se basa en las observaciones de los indicadores ambientales, cuya selección está en correspondencia con las funciones hidrológica, ecológica, ambiental y socioeconómica propias del contexto a evaluar. Los valores resultantes del cálculo del ISAAC en aumento, indican una mejoría de las condiciones ambientales de las aguas en la cuenca y viceversa.

El ISAAC se determinó a partir de la siguiente expresión (1):

$$\text{ISAAC} = \text{ISASUP} + \text{ISASUBt} + \text{ISAFEA} \quad (1)$$

Donde:

ISAAC: Índice de Sostenibilidad Ambiental del Agua en la cuenca

ISASUP: Índice de Sostenibilidad Ambiental de Aguas Superficiales

ISASUBt: Índice de Sostenibilidad Ambiental de Aguas Subterráneas

ISAFEA: Índice de Servicios Ambientales y Funciones Ecológicas del Agua

El cálculo de las diferentes variables se realizó a partir de las siguientes expresiones (2-11):

$$\text{ISASUP} = \text{IQAsup} + \text{IKAsup} \quad (2)$$

$$\mathbf{IQAsup} = \mathbf{E \cdot P \cdot R} \quad (\text{Índice de Calidad del Agua Superficial: Estado, Presión, Respuesta}) \quad (3)$$

$$\mathbf{IKAsup} = \mathbf{E \cdot P \cdot R} \quad (\text{Índice de Cantidad del Agua Superficial: Estado, Presión, Respuesta}) \quad (4)$$

$$\mathbf{ISASUBt} = \mathbf{IQAsubt} + \mathbf{IKAsubt} \quad (5)$$

$$\mathbf{IQAsubt} = \mathbf{E \cdot P \cdot R} \quad (\text{Índice de Calidad del Agua Subterránea: Estado, Presión, Respuesta}) \quad (6)$$

$$\mathbf{IKAsubt} = \mathbf{E \cdot P \cdot R} \quad (\text{Índice de Cantidad del Agua Subterránea: Estado, Presión, Respuesta}) \quad (7)$$

$$\mathbf{ISAFEa} = \mathbf{IKEco} + \mathbf{ISOta} + \mathbf{IBie} \quad (8)$$

$$\mathbf{IKEco} = \mathbf{E \cdot P \cdot R} \quad (\text{Índice de Caudal Ecológico: Estado, Presión, Respuesta}) \quad (9)$$

$$\mathbf{ISOta} = \mathbf{E \cdot P \cdot R} \quad (\text{Índice de Salud y Ordenam. Territorial Ambiental: Estado, Presión, Respuesta}) \quad (10)$$

$$\mathbf{IBie} = \mathbf{E \cdot P \cdot R} \quad (\text{Índice de Biodiversidad y Endemismos: Estado, Presión, Respuesta}) \quad (11)$$

Las observaciones de los *indicadores ambientales de estado, presión y respuesta* seleccionados, correspondientes a los años 2009, 2010 y 2011, pueden verse en las tablas 1, 2 y 3. El valor del índice resultante para cada caso, se muestra en la segunda columna de cada año. Obtenidos de la relación del indicador numerador y el indicador denominador de la primera columna de cada año.

Tabla 1. Indicadores ambientales de Estado: años 2009, 2010 y 2011

ESTADO		año 2009		año 2010		año 2011	
IQAsup	DQO esperado	50	1,67	50	1,67	50	1,72
	DQO promedio	30		30		29	
IKAsup	Vol. de escurr. sup cuenca (hm ³)	22,2	0,007	27,0	0,008	26,0	0,01
	Vol. de escurr. superf. provincia Holguín (hm ³)	3320		3320		3320	
IQAsubt	Vol. de agua subt. sin contam. cuenca (hm ³)	0,24	0,021	0,28	0,024	0,27	0,023
	Vol. total de agua subt. de cuenca (hm ³)	11,6		11,8		11,7	
IKAsubt	Vol. total de agua sub. de cuenca (hm ³)	11,6	0,105	11,8	0,107	11,7	0,106
	Vol. recursos agua subt. provincia Holguín (hm ³)	110		110		110	
IKEco	Long del río con caudal ecológico (km)	2,0	0,120	2,0	0,120	2,0	0,120
	Longitud total del río (km)	16,7		16,7		16,7	
ISOta	Área protegida de la cuenca en buen estado (km ²)	5	0,052	5,0	0,052	5,0	0,052
	Área total de la cuenca (km ²)	96,0		96,0		96,0	
IBie	Número de especies acuícolas real en cuenca	23	0,397	23	0,397	23	0,397
	Número de especies acuícolas esperadas en cuenca	58		58		58	

Tabla 2. Indicadores ambientales de Presión: años 2009, 2010 y 2011

PRESIÓN		año 2009		año 2010		año 2011	
IQAsup	Población asentada en áreas de la cuenca	254350	1,91	254350	1,91	254350	1,91
	Población sin cobertura hidrosanitaria	133280		133280		133280	
IKAsup	Volumen explotado cuenca (hm ³)	4,26	0,19	4,26	0,16	4,26	0,16
	Vol. escurrimiento total de la cuenca (hm ³)	22,2		27,0		26,0	
IQAsubt	Población total asentada en cuenca	254350	1,91	254350	1,91	254350	1,91
	Población sin cobertura hidrosanitaria	133280		133280		133280	
IKAsubt	Vol. de recursos explotados (hm ³)	9,28	0,80	9,28	0,79	9,28	0,79
	Vol. de recursos existentes en cuenca (hm ³)	11,6		11,8		11,7	
IKEco	Vol. embalsado (hm ³)	4,43	0,20	4,43	0,16	4,43	0,17
	Vol. de escurrimiento total de la cuenca (hm ³)	22,2		27,0		26,0	
ISOta	Área urbanizada (km ²)	51,0	0,53	51,0	0,53	51,0	0,53
	Área total de la cuenca (km ²)	96,0		96,0		96,0	
IBie	Núm. empresas focos de contaminación.	16	0,13	16	0,13	16	0,13
	Núm. total empresas en la cuenca	120		120		120	

Tabla 3. Indicadores ambientales de Respuesta: años 2009, 2010 y 2011

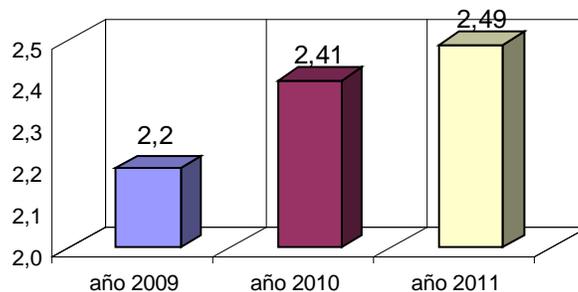
RESPUESTA		año 2009		año 2010		año 2011	
IQAsup	Caudal bajo tratamiento (residuales)	10	0,67	11	0,73	11	0,73
	Caudal usado	15		15		15	
IKAsup	Área agrícola con programa de ahorro y uso eficiente (km ²)	5	0,18	6	0,21	8	0,28
	Área agrícola total (km ²)	28		28		29	
IQAsubt	Vol. agua subterránea tratada (hm ³)	3	0,26	4	0,34	5	0,43
	Vol. agua subterránea total (hm ³)	11,6		11,8		11,7	
IKAsubt	Población con programa de educación ambiental	43673	0,17	43673	0,17	45500	0,18
	Población total de la cuenca	254350		254350		254350	
IKEco	Vol. superficial de explotación real (hm ³)	4,259	1,42	4,259	1,42	4,259	1,42
	Vol. de explotación asignado (hm ³)	3		3		3	
ISOta	Área reforestada (km ²)	5	0,05	6	0,06	8	0,08
	Área total de la cuenca (km ²)	96		96		96	
IBie	Número de empresas cumplidoras con norma de vertimientos	28	0,23	30	0,25	30	0,25
	Número total de empresas en la cuenca	120		120		120	

Los resultados obtenidos del cálculo de los índices de sostenibilidad ambiental del agua en la cuenca para los años observados (2009-2011), se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Índice de Sostenibilidad Ambiental del Agua en la Cuenca

Índices	Año 2009				Año 2010				Año 2011			
	E	P	R	Total	E	P	R	Total	E	P	R	Total
IQAsup	1,67	1,91	0,67	2,12	1,67	1,91	0,73	2,33	1,72	1,91	0,73	2,41
IKAsup	0,007	0,19	0,18	0,00	0,01	0,16	0,21	0,00	0,01	0,16	0,28	0,00
ISASUP				2,12				2,33				2,41
IQAsubt	0,021	1,908	0,259	0,01	0,02	1,91	0,34	0,02	0,02	1,91	0,43	0,02
IKAsubt	0,105	0,800	0,172	0,01	0,107	0,79	0,17	0,01	0,106	0,79	0,18	0,02
ISASUBT				0,02				0,03				0,03
IKEco	0,120	1,908	1,420	0,03	0,120	0,16	1,42	0,03	0,120	0,17	1,42	0,03
ISOta	0,052	0,800	0,052	0,00	0,052	0,53	0,06	0,00	0,052	0,53	0,08	0,00
IBie	0,397	1,908	0,233	0,01	0,40	0,13	0,25	0,01	0,40	0,13	0,25	0,01
ISAFEA				0,05				0,04				0,04
ISAAC	2,2				2,41				2,49			

En la figura 2 se puede apreciar la evolución positiva que ha tenido la cuenca, manifestada a través de la evaluación del ISAAC en los diferentes períodos de tiempo observados. Independientemente que aún existen problemas de sobreexplotación de caudal que se visualizan en los indicadores de respuesta del Índice de Caudal Ecológico IKEco.

**FIGURA 2. Comportamiento anual del ISAAC**

La comprobación matemática de la efectividad de la aplicación del modelo GAIAS se determinó mediante la relación existente entre las mediciones de un año con respecto al otro. Considerándose válida cuando los valores de las variables del ISAAC, se corresponden con la relación dada por la recta, en el intervalo $2.2 \leq X \leq 4.95$, para un grado de confianza de 0.05 y $(k-1)$ grados de libertad, siendo k el número de muestras. La comprobación se efectuó a partir de la prueba de distribución Fischer, donde debe cumplirse que $F_{cal} > F_{tab}$. Es decir se acepta si $F_{cal} > F_{tab}$, para un nivel de significación de $\alpha=0.05$ y $g-l=1,5$. Para lo cual se realizó el análisis de la varianza y la suma de cuadrados del error o residual cuyos resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Resultado del análisis de la varianza y la suma de cuadrados del error o residual

Origen	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F de cálculo
Regresión	4.2630	1	4.2630	63.28
Error o residual	0.3368	5	0.06736	
Total	4.5998	6		

Según la prueba de Fischer, para (1,5) y $\alpha=0.05$, se obtiene: $F_{tab}= 6.61$ y $F_{Cal} = 63.28$. Entonces, se cumple que $F_{cal}>F_{tab}$, por lo que se acepta válida, se comprueba la correspondencia que existe entre las mediciones de un año con respecto al otro y la efectividad de la aplicación del modelo.

CONCLUSIONES

La efectividad del modelo GAIAS radica en las funciones propias de cada uno de los elementos que lo conforman y sus interrelaciones.

La concepción de la cuenca como escenario de gestión para las aguas subterráneas permitió la valoración integral del contexto, y el establecimiento de un plan de manejo integral a nivel de cuenca y no focalizarse puntualmente en la protección de las fuentes de abasto (pozos).

La confección del Mapa de Gestión de la cuenca como parte del modelo, constituyó un elemento fundamental, ya que a través de la zonificación del contexto, se establecieron prioridades de gestión, facilitando las vías para una explotación más racional del recurso agua, la elección de alternativas más favorables de proyectos de abastos con menor costo de explotación y costo ambiental en armonía con el desarrollo económico.

Con su implementación en la cuenca Holguín se desarrollaron una serie de acciones relacionadas con las instituciones contaminadoras, focos contaminantes, programas de educación ambiental, establecimiento de regulaciones, que conllevaron al paso de un estado deteriorado de la cuenca a un estado mejorado. Estos resultados positivos se visualizaron a través del cálculo de los índices de sostenibilidad ambiental del agua en la cuenca (ISAAC), sobre la base de las observaciones de los indicadores ambientales de estado, presión y respuesta, en correspondencia con las funciones hidrológica, ambiental y socioeconómica propias de la cuenca, para los años observados (2009-2011), obteniéndose valores de 2.20, 2.41 y 2.49, lo que representa un incremento positivo de un 13%.

El modelo constituye un valioso instrumento de trabajo para la gestión ambiental de las aguas subterráneas aplicable en cuencas pequeñas con un intercambio hidráulico definido entre la escorrentía superficial y subterránea.

RECOMENDACIONES

Dado los resultados satisfactorios obtenidos de la implementación del modelo GAIAS, se recomienda su generalización a otras cuencas pequeñas con un intercambio hidráulico definido, siempre considerando las particularidades físicas y socioeconómicas de cada contexto en específico. Así como tener presente que la recuperación de las aguas en una cuenca es un proceso a largo plazo, que implica sistematicidad y voluntariedad de los actores involucrados.

REFERENCIAS

- Boudru D y Bernard M.** (2005). “Cuatro modelos de gestión del agua”. Info-Moreno N°106, extraído de: <http://www.info-moreno.com.ar> en marzo 2006.
- CITMA** (2002). “El Sistema Nacional de Monitoreo Ambiental”. Resolución Ministerial 111. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. La Habana.
- Del Río, I.** (2002). “El estado de las masas de agua”. Calidad de las aguas superficiales I. Master en Hidrología General y Aplicada. Monografía. Centro de estudios Hidrográficos del CEDEX. Madrid. España. 24p.
- Fernández, C. S.** (2005). “Diagnóstico y evaluación ambiental de la cuenca Holguín”. Monografía. Centro de Investigaciones y Servicios Ambientales. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. Holguín. 89 pp.
- Fernández, C. S.** (2011). “Herramienta metodológica para la gestión ambiental de las aguas subterráneas en cuencas”. Revista Electrónica Ciencias Holguín. Número XVII-2011, extraído de: <http://www.ciencias.holguin.cu> en diciembre 2011.
- Fonseca, C.** (2005). “ISAAC. Índice de Sostenibilidad del Agua en la Cuenca.”. Desarrollo del ejercicio Lerma-Chapala. Conferencia. Universidad Autónoma de México. 24 pp.
- González, A.** (2005). “El método Delphi y el procesamiento estadístico de los datos obtenidos de la consulta a los expertos”. Conferencia. Documento inédito. Universidad Oscar Lucero Moya. Holguín. 8pp.
- López-Camacho, B.** (2002). “Las aguas subterráneas en el ciclo hidrológico”. Hidrología subterránea I. Master en Hidrología General y Aplicada. Monografía. Centro de estudios Hidrográficos del CEDEX. Madrid. España. 28p.
- PGOU-grupo de autores.** (2000). “Plan General de Ordenamiento Urbano”. Departamento de Arquitectura y Urbanismo. Dirección Provincial de Planificación Física. Holguín.
- Peña, G.** (2005). “Criterios para trabajar con enfoques de cuencas”, Tesis de maestría, Instituto Superior José Antonio Echeverría, La Habana.
- Pérez, S.** (2009). “Estrategia de Comunicación Educativa para la Gestión Ambiental de las aguas subterráneas en el Consejo Popular Pueblo Nuevo”. Tesis de grado en Comunicación Social. Facultad de Ciencias Sociales. Universidad Oscar Lucero Moya. Holguín.
- Yvonnet, B. H.** (1998). “Metodología de las Investigaciones Ambientales”. Diplomado de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Monografía. Universidad Oscar Lucero Moya. Holguín. 53 p.