

# Evaluación de la Cuenca subterránea Vento con el modelo Water Evaluation and Planning system (WEAP)

## *Evaluation of the Vento groundwater Basin with the model Water Evaluation and Planning system (WEAP)*

(Recepción 08/01/2018; Aceptación 11/04/2018)

Sánchez, Y.<sup>1</sup>; Méndez, O.<sup>2</sup>; Hernández A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Empresa Aguas de La Habana. Departamento GIS. Fomento y Recreo, Palatino, Cerro. La Habana, Cuba

<sup>2</sup>Empresa Aguas de La Habana. Departamento Pitometría. Fomento y Recreo, Palatino, Cerro. La Habana, Cuba

<sup>3</sup>Universidad Tecnológica de La Habana. Profesor Titular. Calle 114 #11901, Marianao, La Habana, Cuba.

Teléfono: (+53) 76434950.

Email: [yoany@ahabana.co.cu](mailto:yoany@ahabana.co.cu)

**Resumen.** La modelación de escenarios futuros que incluyan aspectos de demandas, infraestructuras y variables hidro-meteorológicas en la evaluación y administración del agua en la cuenca subterránea Vento resulta novedosa. La investigación propone el uso del modelo Water Evaluation and Planning system (WEAP) con el objetivo de evaluar potencialidades y limitaciones para su desarrollo. Se modelan 5 años hidrológicos y se calibra a partir de mediciones existentes y resultados del modelo, obteniéndose un coeficiente NSE de 0.99. Los escenarios generados demuestran las potencialidades de WEAP para estructurar cambios en la infraestructura, programas de gestión de la demanda y reducción de pérdidas.

**Palabras clave.** Abastecimiento; cuenca; demanda de agua; evaluación y planeamiento de recursos hídricos.

**Abstract.** The modeling of future scenarios including the aspects of demand, infrastructure and hydro-meteorological variables in the water evaluation and planning of the Vento groundwater basin results groundbreaking. The research proposes the use of the Water Evaluation and Planning System (WEAP) with the objective of evaluating potentials and limitations for its development. 5 hydrological years are modeled and the calibration is made from the model's existing measurements and results, which results in a NSE ratio of 0.99. The scenarios generated show WEAP's potentials for implementing changes on the infrastructure, the demand management and the loss reduction programs.

**Key words.** Supply; basin; water demand; evaluation and planning of water resources.

## 1. Introducción

La cuenca subterránea Vento forma parte de la cuenca Almendares-Vento reconocida por el Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas (CNCH) como cuenca de Interés Nacional (García Fernández & Gutiérrez Díaz, 2017). Se ubica en la región occidental de Cuba, en la vertiente Norte del país (Figura 1).

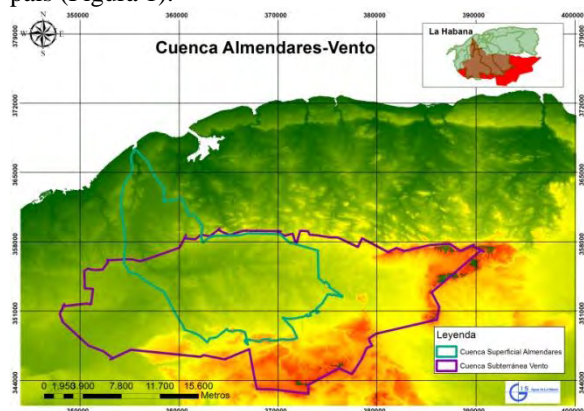


Figura 1. Ubicación geográfica de la cuenca Vento.

La cuenca hidrográfica Almendares abarca una extensión de 422 km<sup>2</sup>. Su red hidrográfica la constituyen numerosos arroyos de carácter

intermitente. Su río principal es el Almendares con una longitud de 49,8 km (Rivera, 2009).

La cuenca subterránea Vento se divide en dos grandes regiones: la cársica y la no cársica. Predominan las pendientes suaves y de llanuras onduladas y se destaca un sistema de bloques sub-horizontales, monoclinales y una estratificación bien marcada (Valcarce Ortega, Rosa M, et al, 2007).

Vento está formado por sedimentos carbonatados, carbonatados terrígenos y terrígenos del mioceno inferior compuestos por sedimentos arenarcillosos, arcillas y depósitos lacustres del cuaternario. Sus recursos aprovechables están estimados en unos 287 millones de m<sup>3</sup>/año (Rivera, 2009).

La cuenca es de gran importancia en el abastecimiento de agua potable a La Habana al constituir el 48% de los volúmenes extraídos (Rivera, 2009) para satisfacer la demanda de 1 479 750 habitantes (Aguas de La Habana, 2016). Resulta fundamental analizar las variaciones en la dinámica Oferta-Demanda (OD) influenciada, entre otros aspectos, por la variabilidad climática, la influencia de la infraestructura de conducción y el crecimiento poblacional en el área que se abastece de la cuenca y teniendo un enfoque eco sistémico.

Vento ha sido estudiada por diferentes autores– (López Infante, 1992), (León & Leslie, 2000), (Hernández, Llanusa, & Dilla, 2003), (Vasallo Aguila, 2003), (Rivera, 2009), (Cuevas-Ojeda, y otros, 2011)–, quienes han abordado temas ambientales y de calidad del agua, interrelaciones con cuencas fronteras, y análisis sobre disponibilidad de recursos hidráulicos, notándose un vacío en el empleo de modelos de gestión que contribuyan a la administración y evaluación del agua, lo que conspira contra una gestión integral desde una perspectiva de cuenca y por tanto contra el uso racional del agua.

Para la elección del modelo fue realizada una búsqueda bibliográfica a partir de las recomendaciones dadas por el Proyecto de Asistencia Técnica: “Estudio de Balance Hídrico de Cuenca Alta del río Apurímac hasta la confluencia con el río Salado (EBHICA)” del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Oficina de las Naciones Unidas de Servicios para Proyectos (UNOPS) (UNOPS-PNUMA, 2013).

En el caso de la cuenca subterránea Vento se selecciona el modelo Water Evaluation and Planning system (WEAP) para desarrollar el tema de la administración y el planeamiento del agua, así como para la generación de escenarios OD basado en sus prestaciones, así como en la accesibilidad en cuanto a licencia para investigación, y las iniciativas de proyectos nacionales que plantean su uso (PNUD-Cuba, 2008), (CITMA-IGT, 2014), (CUBAENERGIA, 2012), (Hervis & otros, 2017).

A partir de WEAP es realizada la modelación de la cuenca subterránea Vento para el período 2000-2005 con el objetivo de iniciar el tema de evaluación y administración del agua por cuencas con un enfoque de OD, establecer limitaciones y validar resultados obtenidos en posteriores estudios con años actuales y de similares tendencias. Fueron generados escenarios de OD que influyen, desde la cuenca, en la gestión de los abastecimientos urbanos y en los planes de enfrentamiento a contingencias.

## 2. WEAP-Vento

WEAP es un modelo para el manejo integral de los recursos hídricos. A través de Programación Lineal Eurística y balances hídricos, se realizan modelos de predicción de la demanda y generación de escenarios contribuyendo a prácticas sustentables de conservación. (Purkey, et al, 2013).

Teniendo en cuenta la dinámica OD en la cuenca Vento, quedó establecido el esquema WEAP según muestra la Figura 2.

Se simplifica la realidad productiva para el abastecimiento de agua a importantes núcleos de La Habana que intervienen en la evaluación de los recursos hídricos de la demarcación hidrogeológica quedando delimitados los puntos de Oferta (O) y

Demanda (D). Los puntos de O fueron definidos a partir de la agrupación de las principales fuentes de abasto subterránea dentro de la cuenca y los sitios D a partir del Sistema de Información Geográfica (SIG) Corporativo de la Empresa Aguas de La Habana (Aguas de La Habana, 2016).

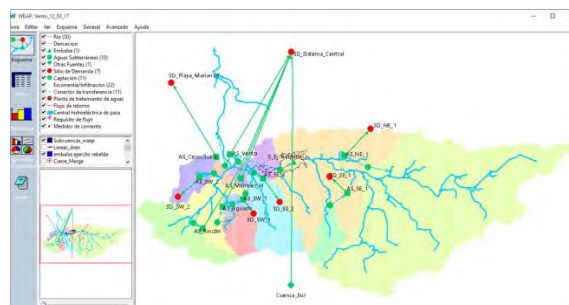


Figura 2. Esquema WEAP –Vento.

El modelo fue calibrado a partir de la comparación entre el déficit de demanda simulado y déficit de producción observado para el Año Hidrológico (AH) 2004-2005 en el Sitio de Demanda (SD) Sistema Central, obteniéndose un Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.99.

El período de calibración es escogido por haber sido este un año hidrológico de déficit significativo producto de una prolongada de sequía (Lapinel, et al., 2014). De igual manera, el SD seleccionado es uno de los puntos abastecidos por la cuenca Vento de mayor importancia para La Habana (Aguas de La Habana, 2016). La Figura 3 muestra el gráfico de calibración entre déficit Real Producido y el simulado por WEAP.

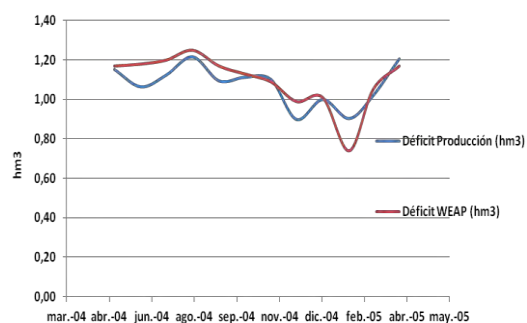


Figura 3. Déficit Real de producción de agua VS Simulado por WAEAP.

Se detalla un comportamiento muy similar a lo largo del AH 2004-2005, observando una tendencia al aumento en déficit, producto de la época de sequía, y a la disminución en época de lluvia. De igual manera, el pico ascendente en el mes de agosto 2004 responde a un mes de alto consumo por temporada estival (al no estar en condiciones el sistema para dar lo demandado existe un notable déficit). Los picos descendientes más significativos responden los meses de diciembre 2004 y febrero 2005, meses de invierno y, por tanto, de reducción de consumos por parte de los usuarios.

### 3. Limitaciones actuales de la evaluación de la cuenca subterránea Vento con el modelo WEAP.

Las pérdidas de agua en el sistema, la curva de modulación y las demandas, fueron estimadas en base a criterio de expertos dada la insuficiencia de información y mediciones concluyentes. Importante resulta la limitante en cuanto a la respuesta hidrogeológica de la cuenca al no estar conectada con un modelo que refleje la dinámica subterránea, la respuesta ante recarga-extracción, las fronteras y la relación directa con propiedades hidrogeológicas de flujo (conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento).

De igual forma, la ausencia de estaciones de aforo en el sistema fluvial Almendares es un factor que limita la calibración a partir de la respuesta hidrológica de la cuenca.

Las soluciones de estas deficiencias son necesarias para acometer desarrollos del modelo WEAP de la cuenca subterránea Vento desde la perspectiva de la gestión integral del agua.

### 4. Resultados. Generación de escenarios con WEAP-Vento.

A partir del modelo calibrado se generan escenarios futuros, mostrándose las potencialidades de WEAP para la toma de decisiones ante cambios climáticos y/o de ordenamiento territorial y su efecto en la planeación y administración del agua enfocados en la operación y gestión de abastecimientos.

En el primero de los escenarios se estimó un aumento hipotético de la población de un 5% para el SD Sistema Central en el AH 2004-2005 comprobándose su influencia en el incremento de la Demanda según se muestra la Figura 4.

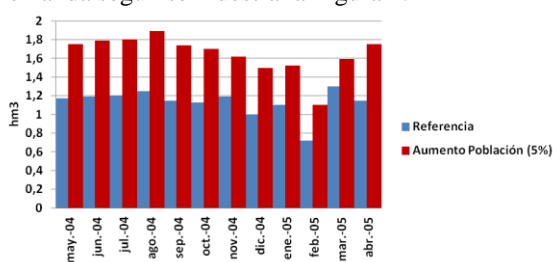


Figura 4. Incremento de la Demanda para AH 2004-2005, SD Sistema Central según aumento poblacional previsto.

A partir del incremento en la demanda experimentado en el primer escenario, se planteó la necesidad de recuperar agua para evitar el uso de fuentes alternativas. Fueron modelados escenarios a partir de la introducción de estrategias de Reducción de Pérdidas (RP) y programas de Gestión de la Demanda (GD). Los resultados mostraron potencialidades de WEAP para conectar la dinámica productiva de la cuenca Vento con la distribución y gestión de la demanda a través de la generación de escenarios.

De manera especial se generó un escenario que demostró estrategias para acercar la demanda prevista en la Norma Cubana NC 973 (NC 973, 2013) a valores reales de explotación de los sistemas de acueducto en Cuba. La NC 973 establece que la demanda en Cuba debe ser 360 litros por persona por día (lppd) para sistemas de acueductos con índices de pérdidas admisibles de hasta un 8% como valor máximo. En la actualidad lo normado no se cumple debido a que las demandas responden a volúmenes de agua producida que tienen implícito elevadas pérdidas de agua y que imposibilita un rendimiento efectivo de la red, o sea, la capacidad de producción de la fuente de abasto gobierna la demanda.

El último de los escenarios generados exploró estrategias, a partir del AH 2004-2005 y el SD Sistema Central, para aumentar la satisfacción de la demanda luego de haber establecido la condicionante del cumplimiento de la NC 973 aún con las deficiencias del sistema. A través de la generación de escenarios, se demuestran estrategias en función de la introducción de. Las estrategias tuvieron en cuenta la GD (%) y RP (%) como indicadores.

- Estrategia 1: RP: 40% GD: 5%
- Estrategia 2: RP: 30% GD: 10%
- Estrategia 3: RP: 20% GD: 20%
- Estrategia 4: RP: 8% GD: 30%

La Figura 5 muestra los resultados de la generación del escenario.

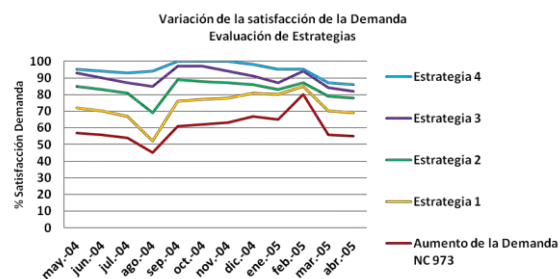


Figura 5. Variación de la satisfacción de la Demanda a partir de escenarios.

A partir de la línea base simulada como *Aumento de la Demanda NC 973* se evidencia la recuperación del porcentaje de satisfacción de la demanda en la medida en que las pérdidas se acercan a valores establecidos por la NC 973 ayudados por programas de GD. La *Estrategia 4* contribuye a definir inversiones necesarias para elevar los rendimientos en los sistemas de acueducto, así como para reducir las demandas a valores normados.

### 5. Conclusiones

El modelo WEAP de la cuenca Vento fue calibrado atendiendo a parámetros relacionados con la demanda en un año hidrológico seco, reflejándose una tendencia similar en cuanto al comportamiento del déficit de agua producida del sitio de demanda

del Sistema Central, lo que avala la factibilidad de su uso y posterior desarrollo.

Quedan establecidas las limitaciones actuales del modelo para análisis integrales de mayor alcance basadas en la ausencia de estaciones de aforo en el río Almendares, escasas mediciones de demandas y del comportamiento de los patrones de consumo.

A partir de la generación de escenarios, se logra ejemplificar las potencialidades de WEAP para la toma de decisiones ante cambios futuros en la planeación y administración integral de la cuenca y en la operación y gestión del sistema de acueducto, mostrándose además el impacto de estrategias previstas para acercar la demanda en la NC 973 a valores reales de explotación en los sistemas de acueducto.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a la Empresa Aguas de La Habana por la confianza y el patrocinio para la realización de esta investigación, a todas las instituciones y personas que aportaron a estos resultados y al Ph.D. Francisco Flores-López del Stockholm Environment Institute por el asesoramiento y los consejos oportunos.

## Referencias

- Aguas de La Habana, S. d. (2016). "Producción de Agua". Dirección de Explotación, Empresa Aguas de La Habana. La Habana, Cuba.
- CITMA-IGT (2014). "Sistema de Modelación para la gestión del agua. Componente Agua para el desarrollo (WATER4DV)". La Habana, Cuba. Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente (CITMA), Instituto de Geografía Tropical (IGT) (Inédito)
- CUBAENERGIA. (2012). "Pronóstico de calidad del aire local y clima regional. Impactos en sistemas energéticos, agua y uso de suelos". La Habana, Cuba: CUBAENERGIA.
- Cuevas-Ojeda, J. L., Gutiérrez Pérez, B., Polo González, B., Jaimez Salgado, E., Núñez Lafitte, M., Guerra Oliva, I., y otros. (2011). "Una aproximación al estado actual del medio ambiente en la cuenca hidrográfica Almendares-Vento. SIG y Multimedia". (I. C. 2011), Ed.) La Habana, Cuba: Instituto de Geofísica y Astronomía.
- García Fernández, J. M., & Gutiérrez Díaz, J. B. (2017). "A 20 Años de la Creación de los Consejos de Cuenca". I Taller de Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas Cubagua 2017. La Habana: Obras. ISBN: 978-959-247-156-6.
- Hernández, A., Llanusa, H., & Dilla, F. (2003). "Modelación de la interrelación entre la presa Ejército Rebelde y la Cuenca Vento. Impactos ambientales evaluados con modelos matemáticos realizados en acuíferos cubanos". Ingeniería Hidráulica y Ambiental.
- Hervis, G., & otros. (2017). "Aplicación del Modelo WEAP, como herramienta para la gestión
- integrada de los recursos hídricos frente a los impactos del cambio climático". I Taller de Gestión Integral de de Cuencas Hidrográficas. Cubagua 2017. La Habana: Obras. ISBN 978-959-247-156-6.
- NC 973, N. C. (2013). "Determinación de la demanda de agua potable en poblaciones urbanas". Norma Cubana. La Habana, Cuba.
- Lapinel, et al. (2014). "Metodología para el estudio de peligro, vulnerabilidad y riesgo por intensa sequía". En Metodologías para la determinación de riesgos de desastres a nivel territorial. Parte I. Grupo de Evaluación de Riesgo de la Agencia de Medio Ambiente (AMA) del CITMA. PNUD-Cuba.
- León, M., & Leslie, F. (2000). "Gestión Integrada y Protección Hidroecológica Vento-Almendares". La Habana: Instituto de Geofísica y Astronomía. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.
- López Infante, E. (1992). "Condiciones Hidrogeológicas de las Cuencas del Escurrimiento Subterráneo Recursos de explotación. Esquema General para el aprovechamiento Integral de los recursos Hídricos y Agrarios de las provincias La Habana y Ciudad de La Habana". La Habana: INRH.
- PNUD-Cuba (2008), "Actividades de apoyo para preparar la Segunda Comunicación Nacional de la República de Cuba con arreglo a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático". PNUD-MINVEC-CITMA. La Habana, PNUD-Cuba.
- Purkey, et al. (2013). "Una presentación de WEAP: Una herramienta para ayudar la gestión integrada de los recursos hídricos en frente del Cambio Climático". Grupo Agua, Stockholm Environment Institute. USA.
- Rivera, V. (2009). "Interrelación Canal Albear, Presa Ejército Rebelde y parámetros de control de la Cuenca Almendares-Vento". Máster en Manejo Integral del Agua, Universidad Tecnológica de La Habana José A. Echeverría. La Habana, Cuba.
- UNOPS-PNUMA. (2013). "Estudio de Balance Hídrico de la Cuenca Alta del río Apurímac EBHICA". Recuperado el 10 de Septiembre de 2016, de <http://www.balancehidrico.org>
- Valcarce Ortega, Rosa M, et al. (2007). Geofísica de pozos y diagnosis matemática en el estudio de la vulnerabilidad de acuíferos. La Habana, Cuba: CUJAE.
- Vasallo Aguila, D. (2003). "Modelación de la interacción entre la presa Ejército Rebelde y la Cuenca Vento. Búsqueda y procesamiento de la información". La Habana: Facultad de Ingeniería Civil. ISPJAE.

