

## DETERMINACIÓN DE LA RECARGA HÍDRICA POTENCIAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA GUARA, DE CUBA

### DETERMINATION OF POTENTIAL GROUNDWATER RECHARGE IN GUARA BASIN OF CUBA

Ing. Dulce María Rodríguez<sup>1</sup> Lugo, Dr. Pedro Pérez Álvarez<sup>2</sup>

#### Resumen

En ocasiones el uso inadecuado de la tierra en zonas que constituyen áreas de aporte a las aguas subterráneas, es incompatible con su conservación. Sucede también que el incremento de la boscosidad en una cuenca hidrográfica, no se potencia en estos lugares, los que poseen una prioridad intrínseca por naturaleza. A partir de la metodología de balance hídrico de Schosinsky y con el auxilio de un Sistema Información Geográfica se identifican las áreas de recarga hídrica al acuífero de la cuenca hidrográfica Guara. Se establece un procedimiento para la identificación de las principales zonas de recarga hídrica, se proponen acciones de protección y manejo de carácter forestal, hídrico, de conservación de suelos y de educación ambiental para la población comunitaria que reside en dichas áreas lo que contribuye al ordenamiento del territorio de este ecosistema. Para determinar cuáles son los sitios con mayor potencial de recarga de agua subterránea, se realizó un balance hídrico de suelos. Con el uso de la cartografía en forma digital, por medio de un Sistema de Información Geográfica (SIG), se generaron mapas digitales que representan el tipo de suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y la precipitación en el área de estudio y con la base de datos se determinaron los coeficientes de las variables: textura del suelo (kfc), pendiente (Kp) y tipo de cobertura vegetal (Kv). La superposición de estos mapas permitió identificar 29 Polígonos Biofísicos (PB), que son áreas con valores iguales de: evapotranspiración potencial (ETP), humedad inicial (Hsi), retención de humedad del suelo (capacidad de campo y punto de marchitez permanente), densidad aparente (DA), infiltración básica del suelo (fc), intercepción de la lluvia y profundidad de las raíces extractoras de agua. En general, en la cuenca se recargan aproximadamente 79 millones de m<sup>3</sup> de agua anualmente, información congruente con los resultados obtenidos por el Gráfico de Control de Balance de las Aguas Subterráneas por el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos de Cuba. Los valores de recarga potencial (Rp) se han obtenido en un período dado y realmente dependen del cambio en las propiedades físicas y uso del suelo, que junto al escurrimiento, pueden provocar una disminución de la Rp, especialmente en aquellos PB con insuficiente boscosidad. Según la Rp, los polígonos se categorizaron con baja, media y alta recarga proponiéndose acciones de manejo que consideran los subprogramas de trabajo del Consejo Nacional de Cuencas para lograr la sostenibilidad de los recursos hídricos.

**Palabras claves:** recarga hídrica, balance, agua subterránea.

#### Abstract

Frequently the inappropriate use of lands groundwater recharge areas is incompatible with their conservation. In addition, the increasing of wooded lands in these catchment areas is not a priority task, what is an important one. With of Schosinsky's hydraulic balance method and the support of a Geographic Information System the hydraulic catchment zones to the Guara basin have identified. A procedure for the identification of the main catchment zones were obtained, different protection and management actions were proposed for the conservation of soils, forest, waters and environmental education of the community as a contribution to the environmental ordination of the territory in these ecosystem. The study determined all of the locations with potential for groundwater recharge through soil water balance. With the use of the cartography in digital form, a Geographic Information System (GIS) has generated digital maps that represent the soil type, slope, the vegetal coverage and the precipitation in the studied area and the data base was used to determinate the coefficients of the variables: soil texture (kfc), slope (Kp) and type of vegetal coverage (Kv). The superimposed maps identified 29 Biophysics Polygons (BP) and there have the same values of potential evapotranspiration (PET), initial humidity (Sih), humidity retention of the soil (field capacity and permanent wither point), apparent density (DS), basic infiltration of the soil (fc), and interception of the rain and depth of the roots that extract water. Around 79 million of m<sup>3</sup> the water have recharged in the basin area annually. This information is congruent with the results obtained by the Control Graphic Groundwater Balance for the National Hydraulic Resources Institute in Cuba. The values of potential recharge (Rp) had obtained in a moment, but the change in the physical properties of the soil, the use of the soil and a major runoff, can cause a decrease of the Rp, especially in the BP with coverage insufficient to forest. Like the Rp, the BP have classified in low, medium, and high recharge, manage actions are defined, considering the programs of National Basin Council for to sustainability of hydric resources.

**Key words:** hydraulic catchment, hydraulic balance, underground water.

<sup>1</sup> Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Mayabeque, Mayabeque, Cuba

<sup>2</sup> Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, La Habana, Cuba

## 1. INTRODUCCIÓN

Es cada vez más fuerte el convencimiento de que nos encontramos inmersos en una grave crisis en relación a los recursos naturales, la escasez de agua para consumo humano, riego, y para otros usos; debido a cambios en regímenes de precipitación, y escurrimientos, a la degradación de los suelos por el mal manejo de la tierra y la pérdida de los bosques, son algunos de los problemas que han generado esta crisis con proporciones a nivel mundial máxime si tenemos en cuenta que los recursos: agua, suelo y bosque están estrechamente relacionados (Orozco, Padilla, y Salguero, 2003).

En el caso de Cuba por la ubicación geográfica del archipiélago y la configuración estrecha y alargada de la isla, se le confieren determinadas particularidades a la disposición de sus recursos hídricos a partir de la red fluvial, conociendo además que la única fuente de alimentación al manto freático son las precipitaciones, y que también siendo un país netamente agrícola, donde el agua subterránea, es una fuente de vital importancia para el desarrollo económico y social del país (INRH, 2012).

La alternativa sostenible para asegurar a mediano y largo plazo el suministro de la cantidad y calidad del agua para la economía, la sociedad y el medioambiente está dado en “desarrollar una política nacional, regional y local del agua, integrada armónica y coherente, encaminada a su uso racional, productivo y eficiente, optimizando la gestión de riesgos asociados a su calidad y a los eventos extremos” (García, Fontova, 2013). Se hace necesario entonces, establecer nuevas concesiones para el aprovechamiento del agua con una dimensión sostenible incorporando términos como: ecosistema, cuenca hidrográfica y ordenamiento territorial.

El enfoque ecosistémico se refiere a “reconocer los ecosistemas naturales y transformados como sistemas complejos, cuyo funcionamiento y capacidad de respuesta ante perturbaciones, dependen de las relaciones dinámicas entre especies, y entre éstas y el medio ambiente, la sociedad y su cultura” (Guerrero, De Keizer, & Córdoba, 2007). Dirigir el enfoque de ecosistema a la gestión de los recursos naturales, constituye una imposición de estos tiempos, para mantener una visión holística y poder comprender como la naturaleza interacciona con la sociedad.

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) es el “conjunto de actividades, mecanismos e instrumentos, dirigidos a garantizar la administración y uso del recurso hídrico mediante su conservación, mejoramiento, rehabilitación y monitoreo y el control de la actividad del hombre en esta esfera”. Es el “proceso” cuyo objetivo es asegurar el desarrollo y manejo coordinado del agua en interacción con otros sistemas naturales, sociales y culturales, maximizando el bienestar económico, sin comprometer a los ecosistemas vitales y brinda un marco propicio para el logro de un aprovechamiento sustentable del agua (García, 2009)

Tradicionalmente se consideraba el enfoque sistémico en el manejo y gestión de cuencas, enfatizando en identificar las entradas y salidas del sistema de la cuenca hidrográfica, principalmente sustentado en el recurso hídrico, actualmente no solo se valora el recurso hídrico, sino también otros recursos como: el aire, la biodiversidad, los suelos, cobertura vegetal, entre otros, siendo insuficiente la gestión adecuada para mantener, mejorar y hacer sostenible el ecosistema, lo cual implica relacionar las variables sociales y económicas, teniendo en cuenta la capacidad del mismo.

En la actualidad en Cuba, la cuenca hidrográfica alcanza una dimensión más integradora e intersectorial, que incluye a los recursos naturales y la infraestructura creada por el hombre, donde se desarrollan sus actividades económicas y sociales y se generan consecuencias favorables y no favorables para el medio ambiente. El Consejo Nacional de Cuencas Hidrográficas desarrolla un trabajo multidisciplinario y sistemático, cumpliendo con la aplicación de la GIRH con enfoque ecosistémico coordinando y evaluando los subprogramas de trabajo del manejo integrado en las cuencas, conllevando a un uso sostenible de sus recursos naturales, vinculado con las actividades económicas y sociales que en ellas se desarrollan, los que se reflejan en la evolución ambiental de las cuencas de interés nacional.

El enfoque ecosistémico complementa la GIRH y su alcance evalúa 11 subprogramas de trabajo en las cuencas hidrográficas en los que se observa la conexión entre ambos conceptos (García, 2007), estos son:

- Políticos y legales.
- Institucionales y organizativos
- De planificación y balances nacionales y de cuencas.
- Hidrológicos e hidrogeológicos (redes y estudios).
- De prevención.
- De infraestructura hidráulica.
- De operación de sistemas.
- Calidad del agua y de los componentes ambientales.
- De sinergias con otros componentes naturales y socio-económicos.
- Científicos y de innovación tecnológica.
- Económicos y financieros.
- Informáticos.
- De educación y comunicación social.
- Culturales.

El recurso hídrico permite el sostenimiento de las relaciones ecológicas así como sus funciones, el desarrollo de actividades productivas y la atención de

las necesidades sociales como consumo, energía, entre otras Barrantes y Vega (2004)<sup>1</sup>.

Es indiscutible que cuanto más caracterizado esté el territorio, así como la distribución y estado de sus recursos naturales, unido a las transformaciones realizadas por el hombre, más efectivas serán las acciones a proponer que contribuyan a mantener el equilibrio de sus elementos básicos (clima, medio físico, agua, suelo, flora y fauna entre otros) de ahí la importancia de realizar una gestión ambiental con ciencia y técnica.

Por tanto, el conocimiento de la recarga potencial al acuífero y la identificación de las áreas de mayor aporte en una cuenca hidrográfica, son un requisito fundamental para posteriormente ejercer sobre ellas una adecuada gestión ambiental, pues el desarrollo económico y social de un territorio transita por su crecimiento demográfico de conjunto con su desarrollo industrial y agropecuario entre otros, además, proporciona indicadores de sobreexplotación, descargas, contaminación; de manera general, constituye una herramienta científica para la gestión ambiental en ese ecosistema.

A partir de la problemática antes expuesta, nos planteamos entonces como problema científico de la presente investigación: No se dispone de un procedimiento técnico, que permita identificar las principales áreas de recarga hídrica potencial en la cuenca hidrográfica Guara”.

Siendo nuestro objeto las principales áreas de recarga hídrica (PAHR) y la investigación se propone, como objetivo general: Caracterizar las Principales Áreas de Recarga Hídrica (PARH) en la cuenca hidrográfica Guara. Para esto se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar las PARH a partir de los parámetros biofísicos de la cuenca.
2. Proponer acciones para un adecuado manejo de las PARH como base para la conservación del recurso hídrico.

### 1.1 Metodologías de estimación de la recarga hídrica

Se conoce como recarga hídrica, al proceso por el cual se incorpora a un acuífero, agua procedente del exterior, además se define este fenómeno como un proceso por el cual el exceso de agua por infiltración sobre la evapotranspiración drena desde la zona radicular y continua circulando en dirección descendente a través de la zona no saturada, hasta la capa freática (Faustino, 2011).

La recarga hídrica puede ser natural, es concebida por el volumen de agua que penetra a un embalse subterráneo durante un periodo de tiempo a causa de la infiltración de las precipitaciones o de un curso de agua (Blanco, 2009).

Existen varios métodos o metodologías, para estimar la recarga hídrica natural en una cuenca hidrográfica, entre otros se mencionan los siguientes:

#### *Métodos de balance de agua*

En general las metodologías de balance esbozan la ecuación general hidrológica: donde evidentemente los principales elementos de entradas y salidas naturales, están dados por la precipitación, el escurrimiento superficial, la infiltración y la evapotranspiración; y quedarían otras variables, de menos cuantía, como la condensación, etc. (González, Marrero, & Martínez, 1999).

La acumulación de la oferta hídrica a través del cálculo del balance hídrico, se hace para determinar si hay problemas de cantidad. En otras palabras, es importante determinar si hay agua suficiente para satisfacer las diferentes necesidades de los diferentes usuarios actuales y potenciales (Barsev, 2008).

En Cuba el control del uso de las aguas tanto de fuentes superficiales como subterráneas en la cuenca, se realiza a través del Balance de Agua conocido por Plan de Uso de las Aguas (PUA), que es un instrumento de planificación con jerarquía legal, que establece y regula el equilibrio demanda-oferta, según las disponibilidades anuales del recurso hídrico y conociendo las demandas de los usuarios, se dispone un balance hídrico incluyendo en él un pronóstico de las precipitaciones, se elabora a niveles sectoriales, municipales y hasta en la esfera nacional de forma trimestral y anual, es la materialización de la gestión integrada del recurso hídrico en función de satisfacer las necesidades de la economía, la sociedad y el medio ambiente, pues para lograr la sostenibilidad de este recurso, “no se aceptan demandas por encima de las entregas garantizadas de los embalses según sus cálculos hidro-económicos, ni superiores a los recursos explotables en el caso de las cuencas subterráneas” (INRH, 2012).

#### *Método hidroquímico*

La recarga por la lluvia a los acuíferos por el balance del ión cloruro, es uno de los métodos de cálculo que se puede emplear en la determinación de la misma, este investiga el aporte atmosférico para llegar a la estimación y la discusión de su valor (Faustino, 2011).

Según Alcalá, (2005) en régimen estacionario, el agua subterránea freática recibe un flujo másico de Cl<sup>-</sup>, igual al aporte por la lluvia, después de restar el flujo que escapa por escorrentía directa y aunque esta metodología aporta un valor de la tasa de recarga por la lluvia esperable en un lugar, no calcula el volumen almacenado, ya que este concepto depende del tiempo medio de residencia del agua subterránea.

1 citado por Blanco Rojas (2009)

Las aguas superficiales y las subterráneas que yacen a poca profundidad se encuentran en equilibrio dinámico con la atmósfera, la posibilidad de determinar la recarga por estos métodos, se calcula por la correspondencia entre el tiempo de vida y los parámetros físico-químicos de las aguas (García, 2007).

El balance del ión cloruro es factible ya que este es un soluto conservativo y que normalmente no es aportado por el terreno entre sus propiedades están que es muy soluble, no interactúa con el medio, es fácil de muestrear y el terreno carece de cantidades significativas del mismo, su ecuación de balance es la siguiente:

$$Inf = \left(1 - \frac{E\%}{P}\right) \frac{Cp}{Ci} \quad (1)$$

Donde:

Inf = coeficiente de infiltración

$C_p$  = valor medio de cloruros aportados por la lluvia (ppm)

$C_i$  = valor del contenido de cloruros en el agua subterránea (ppm)

$E_{\%}$  = % estimado de escurrimiento a partir de la lluvia (mm)

P = precipitación (mm)

$$E = P (1 - Inf) - E_{\%} \quad (2)$$

Donde:

E = valor de la evapotranspiración (mm)

Inf = coeficiente de infiltración

$E_{\%}$  = % estimado de escurrimiento a partir de la lluvia (mm)

P = precipitación

Por tanto

$$I = P - E - E_{\%} \quad (3)$$

Donde:

E = valor de la evapotranspiración (mm)

I = valor de la infiltración (mm)

$E_{\%}$  = % estimado de escurrimiento a partir de la lluvia (mm)

P = precipitación (mm)

### Método participativo

Este método elabora una propuesta metodológica práctica y de aplicación simple por parte de actores locales, para identificar zonas con potencial de recarga hídrica, e intenta conjugar el conocimiento técnico y científico con el conocimiento y experiencia local de las comunidades en subcuencas hidrográficas, mediante talleres participativos con los pobladores de las comunidades y especialistas que trabajan en la zona (Faustino, 2011).

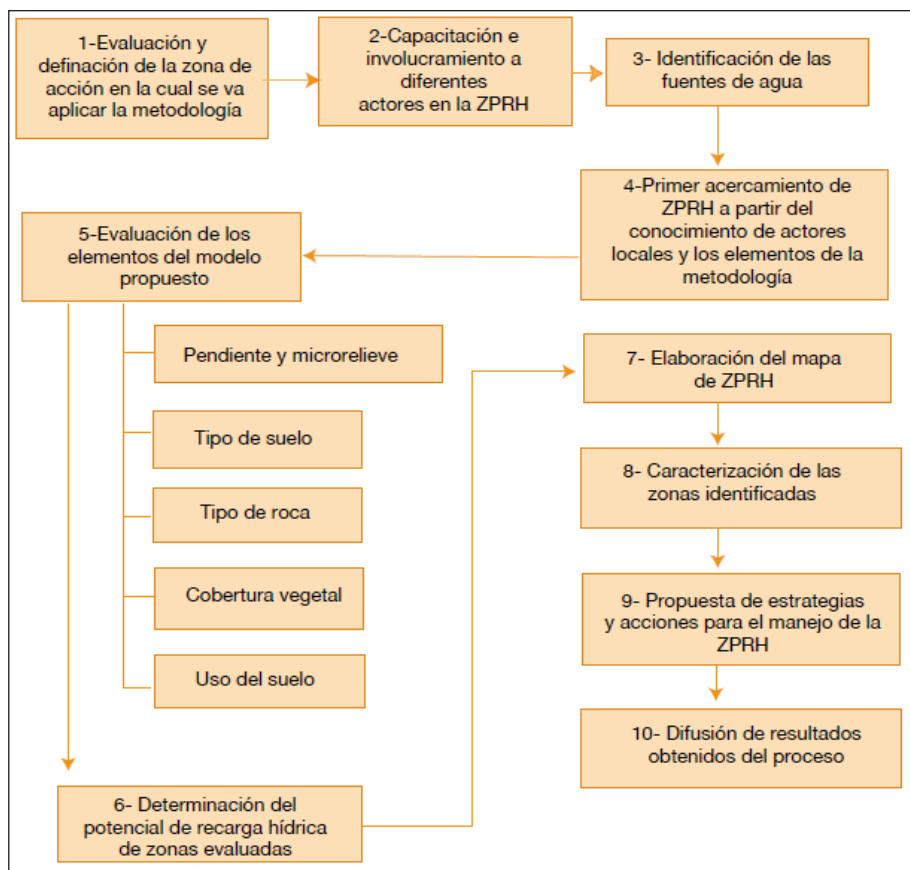


Figura 1. Pasos del Método Participativo.

Fuente: Matus, Jorge (2007)



El método participativo para la identificación de las zonas de recarga hídrica, por lo general, está al alcance de los organismos, comités de cuencas y tomadores de decisiones locales responsables del manejo de estas. Esta propuesta metodológica aporta herramientas prácticas, sencillas, de fácil uso y bajo costo para que los actores, facilitadores y tomadores de decisiones a nivel local de cuenca, puedan identificar zonas potenciales de recarga hídrica y orientar las acciones de protección, conservación y aprovechamiento de dichas áreas (Matus, Faustino y Jiménez, 2007).

#### Métodos de balance hídrico de suelos

El estudio del balance de suelos se basa en el principio de la conservación de la materia. O sea, el agua que entra a un suelo, es igual al agua que se almacena en el suelo, más el agua que sale de él. Las entradas son debidas a la infiltración del agua hacia el suelo, y las salidas se deben a la evapotranspiración de las plantas, más la descarga de los acuíferos (Schosinsky, 2006).

El potencial de las aguas subterráneas, se estima determinando la recarga al mismo, que se calcula conociendo en primer lugar, la fracción de lluvia que es interceptada por el follaje. En segundo lugar, se

requiere conocer la infiltración del agua de lluvia hacia el suelo, generada por la precipitación que llega a su superficie. En tercer lugar, se debe realizar un balance de suelos, que nos permita estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero y que se encuentra ubicado debajo de este (Faustino, 2011).

El balance de suelos permite “estimar si el cálculo de la recarga hídrica potencial al acuífero” integrando todos los valores en los cuales se puede dividir la precipitación que cae sobre un área determinada en la zona no saturada (Orozco, Padilla & Salguero, 2003).

#### Descripción del área de estudio

La cuenca hidrográfica Guara es de origen natural y abierto, se encuentra ubicada en la zona suroeste de la provincia Mayabeque de la República de Cuba. Posee un área de 157.8 Km<sup>2</sup> y sus límites se corresponden: por el Norte con las elevaciones de Cotilla y Managuaco, al Este y Oeste con la Llanura Roja Habana-Matanzas y por el Sur con el Golfo de Batabanó, su afluente principal es el río Bayamo, que nace en la parte alta de la cuenca desembocando en la costa con una longitud de 32.5 Km, es intermitente condición propia de las corrientes superficiales cubanas, con dependencia total de las precipitaciones.



**Figura 2.** Ubicación cuenca hidrográfica Guara.

Fuente: Geocuba (2013)

El punto de origen con coordenadas (Norte: 344730, Este: 377374) se corresponden con la Loma El Gallo en las elevaciones antes mencionadas y en la desembocadura la Playa Santa Isabel con coordenadas (Norte: 317890, Este: 377040) en el Golfo de Batabanó. Siendo sus cuencas vecinas al Norte Almendares - Vento, al Este Mayabeque, al Oeste Quivicán y al Sur el mar. El relieve es ondulado en la parte alta y llano en las partes media y baja, donde descarga el río y las lluvias constituyen la principal fuente de alimentación en el área, las cuales por el escurrimiento superficial pasan a formar parte del acuífero subterráneo.

Su geología está conformada por varias fajas latitudinales muy bien definidas, orientadas de sur a norte, las rocas tienen un plegamiento de tipo anticlinorio que debió originarse a finales del Eoceno, no aflorando rocas del Paleoceno o más antiguas, de forma general la litología está representada por varias formaciones geológicas miocénicas carbonatadas: Formaciones Jaruco, Husillo, Cojimar y Güines, todas son calizas blanco-cremas organógenas, cársicas, duras.

A partir de trabajos geofísicos y por tener una amplia Red Hidrogeológica compuesta por pozos

de observación de oscilación de niveles de las aguas subterráneas (de ellos 8 ubicados en el área de estudio), teniendo en cuenta la litología, las características geológicas del escurrimiento subterráneo, la dirección principal de flujo y otras consideraciones, se definen los límites de los acuíferos y sus tramos hidrodinámicos, con lo que se elaboró un mapa para la evaluación de los recursos de explotación de las aguas. (INRH, 1991). La cuenca hidrográfica Guara está ubicada en el centro de la cuenca hidrogeológica representando el 45 % de toda al área del acuífero.

El acuífero es libre enmarcado en una llanura cársica que junto a la presencia de un suelo muy permeable y al pobre drenaje superficial la alimentación fundamental de las aguas subterráneas está dada por la infiltración directa de las precipitaciones la dirección del flujo es hacia el Sur en donde se [produce la descarga hacia el mar en forma de escurrimiento a través de las rocas intensamente carsificadas y fracturadas siendo controlado por un humedal que se extiende a lo largo de toda la costa formando parte de la Cuenca Costera Sur.

Por tener un mayor escurrimiento subterráneo, se divide en cinco tramos hidrodinámicos que son los siguientes: Corojal (HS-1), Norte de Artemisa (HS-2), Artemisa - Quivicán (HS-3), Melena-Nueva Paz (HS-5), y Batabanó (HS-4), correspondiendo este último a la cuenca hidrográfica en estudio, el que posee un área total de 353 Km<sup>2</sup>, la profundidad de yacencia de las aguas subterráneas es de 40 m en la zona premontañosa hasta 0 m en la línea de la costa; los gastos específicos en el tramo varían de 50 a 100 l/s/m; el espesor es de hasta 150 m. Su recurso explotable está evaluado en 107Hm<sup>3</sup> (INRH, 2010).

Los recursos hídricos superficiales se componen por el embalse La Ruda, el Canal Pedroso-Güira y el propio río Bayamo; la forma alargada de la cuenca hidrográfica constituye una característica importante en la formación del escurrimiento, la presa está ubicada en la parte alta y cubre los déficit de agua para el riego de cultivos varios en las provincias Mayabeque y Artemisa, vinculada al sistema hidráulico, Canal Pedroso-Guira, garantizando las demandas de agua de la agricultura con un gasto normal de diseño de 8.0 m<sup>3</sup>/s.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Antecedentes: Cálculo de la recarga hidráulica en Cuba

El Decreto Ley 138 de las Aguas Terrestres en Cuba en su Capítulo IV, artículo 32 expresa que: "con el objetivo de lograr la eficiencia y la racionalidad mayores en la regulación, el aprovechamiento, el uso, la preservación y el saneamiento de las aguas terrestres, en armonía con los demás recursos naturales y con el desarrollo económico-social del país, se realizarán estudios técnico-

económicos integrales, denominados esquemas de aprovechamiento hidráulico, los que tendrán carácter nacional, regional, provincial o zonal".

A su vez la Ley 81 de Medio Ambiente en el capítulo IV sección segunda, sobre las aguas terrestres refiere que: "El Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos, en coordinación con otros órganos y organismos competentes, es el encargado del control y desarrollo de las acciones encaminadas a la gestión de las aguas terrestres, con excepción de las aguas minero-medicinales.

Por tanto en Cuba el objetivo principal, de una investigación hidrogeológica completa, es llegar a evaluar las posibilidades de aprovechamiento hidráulico no sólo cualitativamente sino sobre todo, cuantitativamente. Esto es, lo que se conoce como el cálculo de los recursos y reservas de las aguas subterráneas., según las metodologías existentes, siendo el método más desarrollado el de las oscilaciones de los niveles de las aguas subterráneas, creándose un nuevo enfoque conocido como el Gráfico de Balance de las Aguas Subterráneas (GCBAS) (Plaza, 2010).

Este método, tiene como primer y más importante logro, que evalúa (determina) la alimentación o recarga neta al acuífero, directamente, evitando el engorroso método de determinar la infiltración, que como sabemos necesita de mediciones especiales para ser confiable su entorno. Parte de la fórmula de las oscilaciones del nivel (Fórmula de Bindeman), y de las deducciones que se hicieron con referencia a igualar ésta con Darcy salieron otras que son novedosas y se adaptan a los cálculos necesarios. Es bueno aclarar, que el llamado GCBAS, no es sólo un gráfico como tal sino un complejo proceso de cálculo de magnitudes del balance interno del acuífero, de variables y requisitos técnicos del régimen, establecidos para lograr una metodología de evaluación, que agrupa tablas, gráficos y fórmulas de cálculo.

La autora considera que esta metodología es muy eficaz para evaluar recursos ósea, volúmenes reales en el acuífero con fines operacionales y de explotación, pero no permite identificar las áreas que en la cuenca hidrográfica recargan el mismo con fines de establecer en ellas un adecuado plan de manejo con fines de proteger y ordenar el territorio para lograr la sostenibilidad del recurso.

No obstante los lineamientos de la política económica y social del Partido y la Revolución No 196 y 204 expresan: "Desarrollar un programa integral de mantenimiento, conservación y fomento de plantaciones forestales que priorice la protección de las cuencas hidrográficas" y "Actualizar y ejecutar programas dirigidos a la preservación y rehabilitación de los recursos naturales que se utilizan: suelos, agua, bosques, animales y plantas, capacitando a los productores en gestión ambiental y aplicando con mayor rigor las regulaciones establecidas", respectivamente.

## 2.2 Metodología

A nuestro juicio y analizando todas las metodologías expuestas se selecciona el método de balance de suelos, se emplea la metodología de Gunter Schosinsky N. (2006), para el cálculo de la recarga potencial de acuíferos, adaptada a las condiciones cubanas en cuanto a los parámetros de cálculo, proponiéndose además nuevas consideraciones a la metodología, aunque no toma en cuenta el comportamiento del ciclo hidrológico en las zonas urbanizadas y los cuerpos de agua.

También para la identificación de las zonas de recarga hídrica, se realizaron inspecciones y recorridos por la cuenca de estudio, tomándose evidencias fotográficas y testimonios, que aportaran veracidad a las variables de cálculo como la infiltración y la influencia con la vegetación.

La metodología empleada puede resumirse en los pasos siguientes: (1) caracterización general de la cuenca; (2) determinar los rangos de pendientes; (3) distribución de las precipitaciones; (4) cálculo de la evapotranspiración; (5) reconocimiento de la cobertura vegetal; (6) determinación del tipo de suelo y sus propiedades físicas; (7) determinación de los polígonos biofísicos; (8) aplicación de la ecuación de balance; (9) cálculo de la recarga potencial. Cada paso tiene implícito coeficientes.

Se refiere, que la metodología aplicada y adaptada a las condiciones cubanas, (en cuanto a los coeficientes

por textura de suelo y cobertura vegetal), no solo permite identificar las zonas de recarga hídrica, más vulnerables a la escasez o desaparición total de los recursos hídricos, sino también permite adoptar una serie de medidas que reviertan esta situación y contribuyan con la implementación de buenas prácticas, al ordenamiento del territorio y por tanto a la protección de este recurso natural, además al tener una salida cartográfica de fácil interpretación, pone en disposición de los decisores los resultados, para insertarlos en las estructuras y funcionamientos a nivel de municipio y consejos populares.

Los resultados de la aplicación de esta metodología se validaron con los del GCBAS en el tramo hidrogeológico del área de estudio.

## 3. RESULTADOS

La cuenca hidrográfica es un ecosistema, integrado principalmente por sus recursos y los usuarios de ellos, la valoración de los recursos expresa la potencialidad de oportunidades, pero fundamentalmente define los límites o niveles de intervención (soporte) sobre el medio físico. La oferta de recursos, su calidad y distribución determinan su vocación y da posibilidades para el hombre, de ella dependen para qué sirve la cuenca y su uso predominante.

A partir del cálculo de las variables que interviene en el balance de suelos y siguiendo los pasos

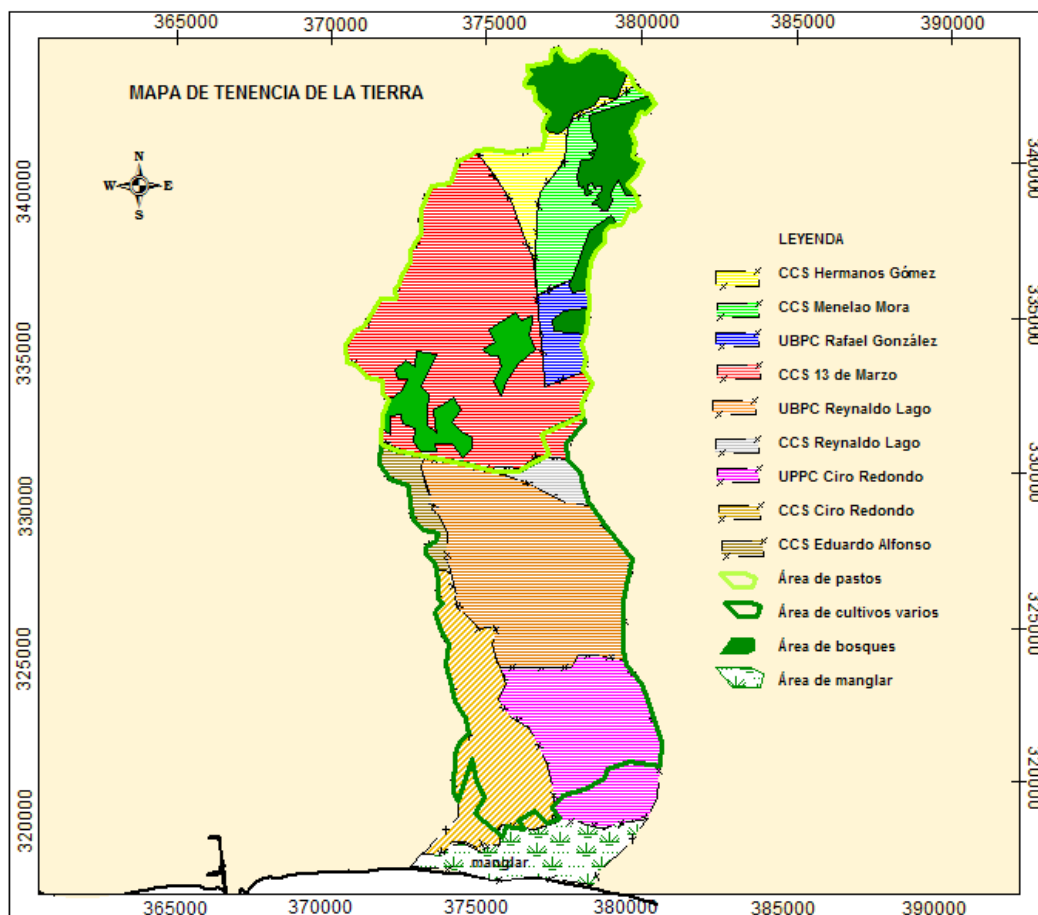


Figura 3. Tenencia de la tierra cuenca hidrográfica Guara



de la metodología, se pudo conocer que: la lluvia promedio anual en la cuenca hidrográfica Guara es de 1573 mm, determinada por una red hidrológica compuesta por 11 pluviómetros con más de 30 años de observación. Producto de la temperatura y la heliofanía solar 23.9°C y 2701 horas sol al año respectivamente medidas en una estación climática cercana a la cuenca Guara, el 51% de la lluvia caída se evapotranspira por la cobertura vegetal existente, determinada por la fórmula de Thonhwhite, mantiene un relieve llano pues sus pendientes promedios se clasifican como planas, estando su mayor elevación a 238.0 msnm.

En la parte alta de la cuenca predominan los pastos y algunos pequeños bosques y matorrales, en la parte media y baja, la agricultura asume las mayores áreas con cultivos como viandas, hortalizas, frijol, entre otros y en la zona costera predomina el manglar. La transpiración vegetal del área de estudio no es compleja, ya que en la misma la cobertura está bien definida, en su parte alta predominan los pastos, (pastizal) pertenecientes a la Empresa Agropecuaria Nazareno (65.15 Km<sup>2</sup>), en la que se intercalan algunos bosques naturales y matorrales secundarios, en la media y baja se cosechan cultivos varios (granos, viandas y hortalizas) pertenecientes a la Empresa Agropecuaria Melena del Sur (41.96 Km<sup>2</sup>) y la Empresa Agropecuaria Batabanó (20.01Km<sup>2</sup>) y

finalmente, la zona costera abarca aproximadamente 6.20 Km<sup>2</sup> de ciénaga y 10.67Km<sup>2</sup> de manglar.

En el área de estudio se identifican en su mayoría suelos de textura arcillosa relacionados con la Llanura roja Habana-Matanzas, obteniéndose sus propiedades físicas de la Clasificación Agroproductiva de los Suelos de Cuba, lo que se digitalizó con un SIG para confeccionar el mapa de los suelos. Por su textura existen 2 tipos de suelos: arcillosos y arcilloarenosos (Hernández, et al, 1999).

### 3.1 Identificación de los polígonos biofísicos.

Dirigir el enfoque de ecosistema a la gestión de los recursos naturales, constituye una imposición de estos tiempos, para mantener una visión holística y poder comprender como la naturaleza interacciona con la sociedad (Guerrero, Keizer & Córdoba, 2007).

Como se define anteriormente, la cuenca hidrográfica es un sistema compuesto de varios subsistemas, como el biológico (vegetación), físico (suelos). De ahí que en este trabajo se ha nombrado como polígono biofísico a aquella unidad o área, con características similares de suelo, pendiente topográfica y vegetación vinculándolas con la lluvia.

A partir de lo anterior, se obtiene 29 Polígonos Biofísicos (PB) agrupando las zonas con iguales variables biofísicas como: tipo de suelo, pendiente,

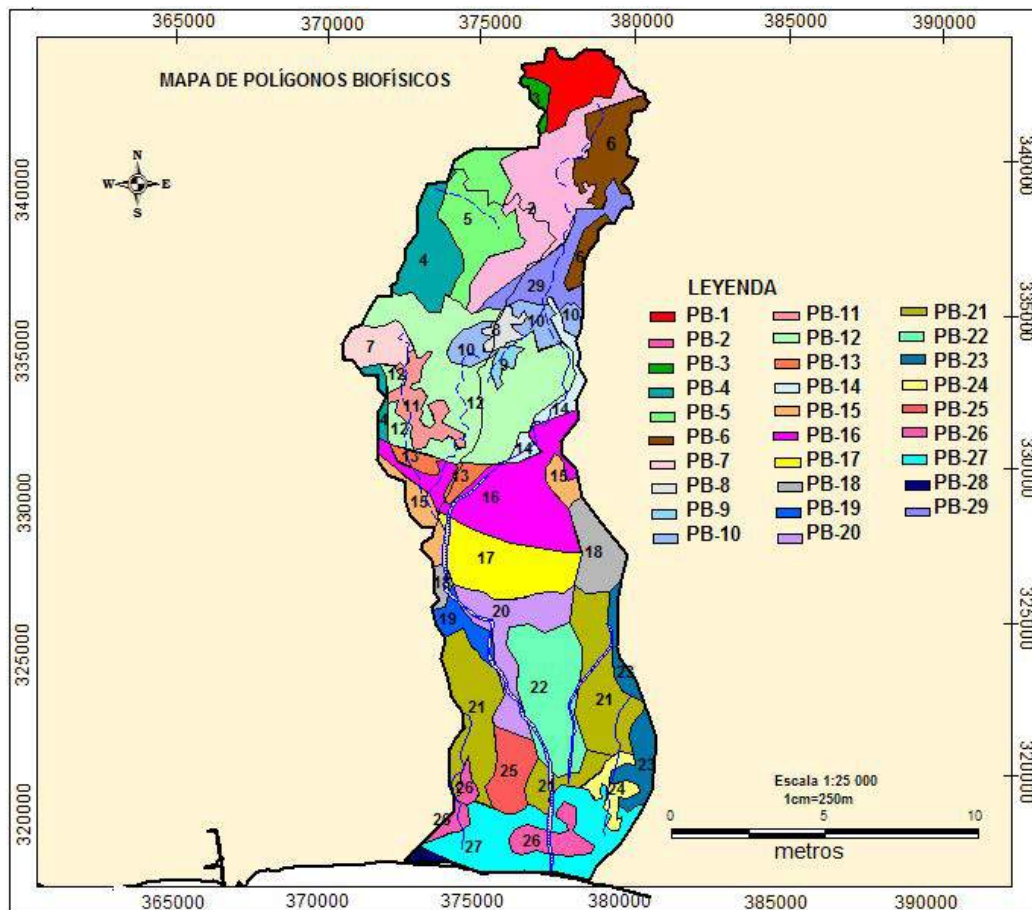


Figura 4. Polígonos biofísicos cuenca hidrográfica Guara



cobertura vegetal y precipitación y con el apoyo de un SIG, se elaboró un mapa digital donde se agruparon las capas de vegetación, textura de suelo, pendiente y precipitación.

Según Junker (2005), en el Método RAS para el cálculo de la recarga hídrica en El Salvador, analiza la influencia de la transpiración en el asfalto, lo que se tuvo en cuenta en este trabajo.

### 3.2 Cálculo de la recarga hídrica potencial (Rp) al acuífero

En cada polígono identificado se aplicó la ecuación de balance hídrico de suelos propuesta por Schosinsky y el objetivo de la misma es determinar parámetros hidrológicos (infiltración, escurrimiento, evapotranspiración y fundamentalmente, el volumen de agua que pasa a formar parte del acuífero).

**Tabla 1.** Ecuación Balance Hídrico de Suelos. Fuente: Schosinsky 2006

Zona de Estudio:													
Textura de Suelo:							Fecha:						
Simbología													
fc: Capacidad de Infiltración							P: Precipitación Media Mensual						
I: Infiltración							Pi: Precipitación que infiltra						
CC: Capacidad de Campo							ESC: Escorrentía Superficial						
PM: Punto de Marchitez							ETP: Evapotranspiración Potencial						
PR: Profundidad de Raíces							ETR: Evapotranspiración Real						
(CC-PM): Rango de Agua Disponible							HSi: Humedad de Suelo Inicial						
DS: Densidad de Suelo							HD: Humedad Disponible						
C1: Factor de ETP, por cierre de estomas, antes que ocurra ETR							HSf: Humedad de Suelo Final						
C2: Factor de ETP, por cierre de estomas, después que ocurre ETR							DCC: Déficit de Capacidad de Campo						
Kp: Factor por pendiente							Rp: Recarga Potencial						
Kv: Factor por vegetación							NR: Necesidad de Riego						
Kfc: Factor estimado con base a la prueba de infiltración							Ret: Retención de Lluvia						
fc [mm/d]						?							
Kp [001%]						?							
Kv [001%]						?			por peso				
Kfc [001%]						000			(%)	(mm)			
I [001%]						000			CC	?	000		
DS (g/cm³):						?			PM	?	000		
PR (mm)						?			(CC-PM)	000	000		
HSi (mm)						?							
Nº de mes con que inicia HSi;1,2,3 12?						?							
Lluvia retenida [001%] : Bosques=02, otros=012						?							
Distribución mensual													
Concepto	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
P (mm)	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	000
Ret [mm]	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000
Pi (mm)	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000
ESC (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETP (mm)	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	000
HSi (mm)	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
C1	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
C2	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
HD (mm)	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000
ETR (mm)	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
HSf (mm)	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
DCC (mm)	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	
Rp (mm)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	000
NR (mm)	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000	000

La ecuación de balance antes mencionada, relaciona todos los componentes y para su aplicación se requirió de los datos que están señalados con un signo de interrogación (?) y el volumen de recarga potencial al manto freático en la cuenca hidrográfica Guara, alcanza un valor total de 79 009.35 m<sup>3</sup>/año.

A modo de resumen se afirma, que el 32% de la precipitación que cae en la cuenca, llega a ser, recarga potencial al acuífero, el 15% se retiene en el follaje, el 51% evapotranspira a través de la vegetación y el 2% se convierte en escurrimiento producto de las áreas urbanas el que se obtiene por la propia ecuación de balance.

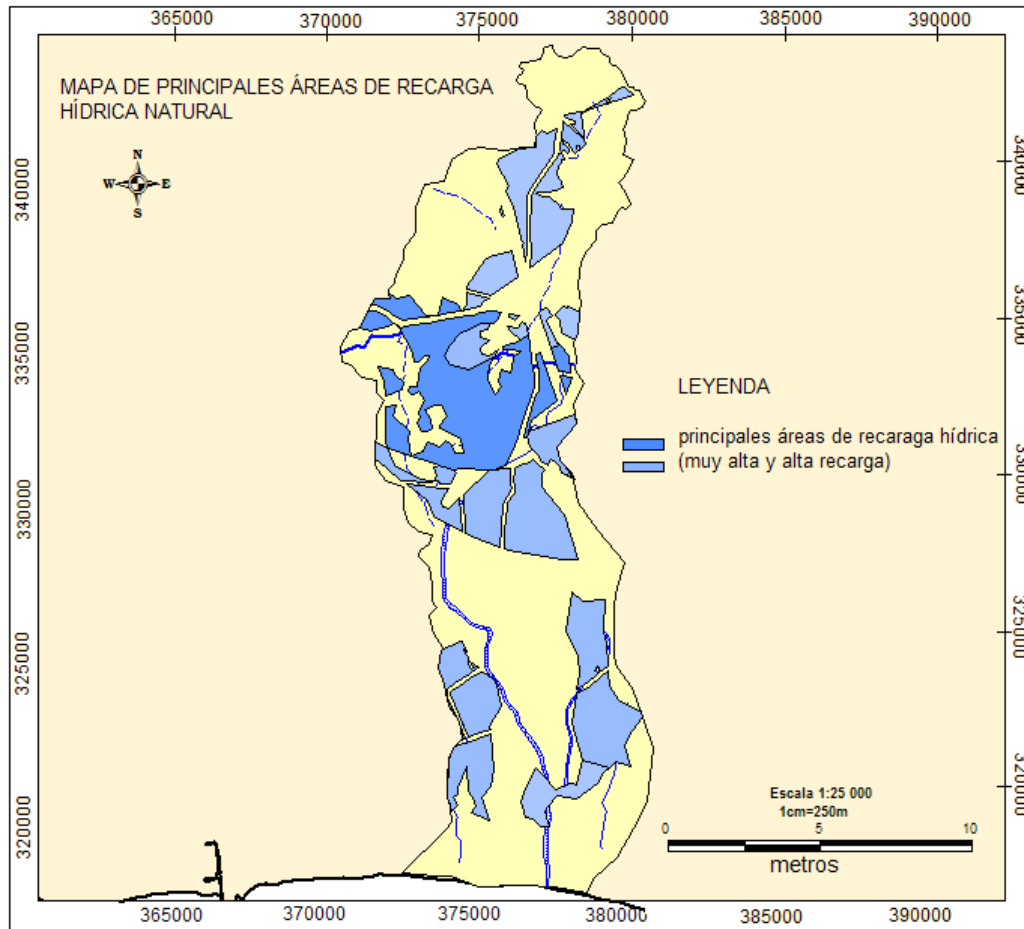


Figura 5. Principales áreas de recarga hídrica en la cuenca hidrográfica Guara.

Tabla 2. Variables finales de comprobación del balance de suelos

Precipitación	Infiltración	Escurrimiento	Evapotranspiración	Retención follaje	Recarga
m/Km <sup>2</sup> / año					
47.187	39.207	0.974	23.684	7.006	15.523

### 3.3 Validación de los resultados

El objetivo de las redes de observación del ciclo hidrológico, es informar sobre la evolución de la cantidad y calidad del agua. La red hidrogeológica de la cuenca está compuesta por 8 pozos de sondeo, de ellos 6 con frecuencia mensual, y 2 con frecuencia semestral, la red pluviométrica consta de 6 equipos y para el monitoreo de la calidad del agua, existen 3 estaciones (EAHMY, 2013).

Según el GCBAS se estima que la recarga promedio anual es de 87 cm con un volumen de recarga de 0,160 Hm<sup>3</sup> en todo el acuífero durante el año de estudio 2013, mientras que según Schosinsky en la cuenca hidrográfica el valor es de 54 cm y el volumen de recarga es de 0,079 Hm<sup>3</sup> y nunca los niveles alcanzaron la zona de entrega restringida.

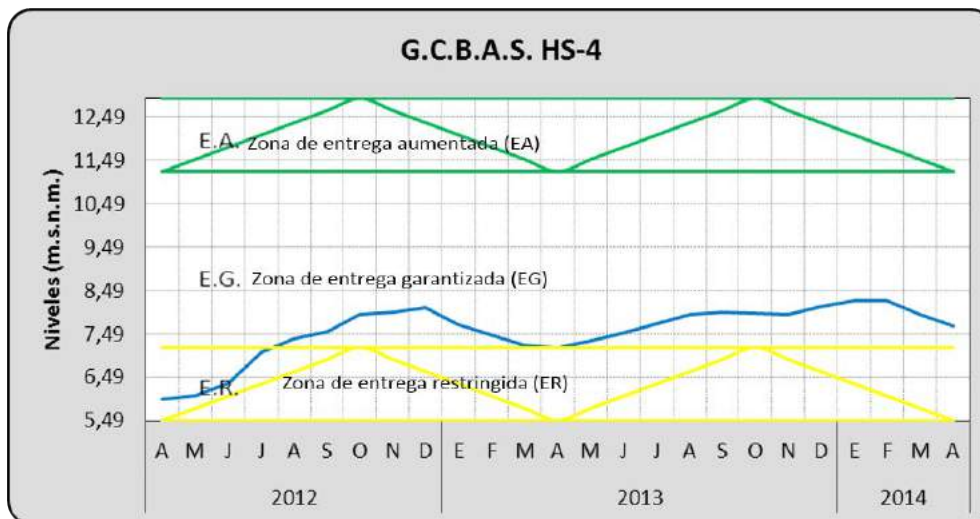


Figura 6. Gráfico de Control de Balance de las Aguas Subterráneas.  
Fuente INRH, EAHMY (2013)

Lo anterior minimiza la incertidumbre de esta estimación de la ecuación de balance hídrico a partir del balance de suelos ya que los resultados obtenidos se corresponden con las dimensiones de ambas cuencas, el acuífero tiene un área de 353,0 km<sup>2</sup> y la cuenca superficial 157,8 km<sup>2</sup>. Recordemos que el territorio que abarca el área de estudio representa el 45 % del área total de su cuenca hidrogeológica.

Esta investigación propone superponer cada mapa temático, (suelos, vegetación, lluvia, uso de suelos) con el resultante de las principales áreas de recarga en la cuenca, enfocando las acciones, en cinco vertientes fundamentales: protección del recurso hídrico, desarrollo forestal, agropecuario, urbano y fortalecimiento de capacidades, donde se incluye la educación ambiental.

A partir de la superposición del mapa resultante de las principales áreas de recarga hídrica natural, con los mapas de temáticos se pueden implementar estrategias de carácter local, sobre la base de una información fácilmente accesible y confiable, favoreciendo así el uso eficiente y racional del agua y su sostenibilidad.

Se propone entonces, un plan que contenga acciones concretas y funcionales a partir de los resultados plasmados en esta investigación, que aunque está referida a los recursos hídricos, no se puede obviar su sinergia con otros componentes naturales.

### 3.3.1 Propuesta de acciones en las áreas de mayor recarga hídrica

#### Acciones de protección del recurso hídrico

- Mantener el terreno con cobertura vegetal y dar prioridad a productos biológicos como fertilizantes en las áreas de cultivos varios.
- Analizar las nuevas perforaciones de pozos en las principales áreas de recarga hídrica natural.

- Fortalecer el monitoreo de las variables del ciclo hidrológico (pozos de observación de niveles, pluviómetros, estaciones de calidad etc.).
- Mantener el control de la explotación de las aguas subterráneas a través de los sondeos mensuales que permiten conocer las oscilaciones de los niveles de las aguas subterráneas y la actualización del GCBAS.
- Incorporar en los planes de inversión de la localidad, acciones de rehabilitación de las instalaciones hidráulicas en las vaquerías y poblados para el ahorro y uso racional del agua.
- Concebir sistemas de tratamiento de residuales en las nuevas inversiones que se ubiquen en estas áreas por ser vulnerables a la contaminación del agua subterránea.
- Ejecutar los proyectos de reforestación establecidos en los embalses que lo posean para la protección de su faja forestal.
- Cumplir los requisitos establecidos en la Norma (NC 93-11/209) referentes a las zonas de protección sanitaria, en los pozos de abasto a población.

#### Acciones para el desarrollo forestal

- Intensificar el Plan de reforestación del Servicio Estatal Forestal, de los municipios Melena, Batabanó y San José, tomando como base el mapa de las principales áreas de recarga hídrica natural.
- Desarrollar sistemas de agroforestería y silvopastoriles con prioridad en las entidades: CCS 13 de Marzo, UBPC Reynaldo Lago y CCS Menelao Mora, fundamentalmente por ser los te nientes de la tierra en las zonas potenciales para la reforestación.

3. Contemplar actividades de aprovechamiento óptimo de los bosques, incentivando la aplicación de tecnologías adecuadas, ya que esta cuenca tiene como actividad fundamental la ganadería y la agricultura y por su propio desarrollo económico, no sería adecuado reemplazarla totalmente de bosques como solución final para la conservación de sus suelos y el aporte de agua al acuífero.
4. Incluir en el Plan de reforestación, la faja forestal del embalse la Ruda, así como las de las micropresas existentes, de manera conjunta entre el Servicio Estatal Forestal Municipal de San José, la Empresa Genética Agropecuaria Nazareno y la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Mayabeque.
5. Suspender definitivamente toda labor de aprovechamiento forestal en una profundidad de 15 km a partir de la línea costera, categorizándola como áreas de conservación recuperando en especial los manglares y el área de ciénaga.

#### *Acciones para la conservación de suelos y desarrollo agropecuario*

1. Desarrollo de sistemas productivos de uso múltiple como el intercalamiento de cultivos.
2. Incentivar en los productores de las entidades pertenecientes a las Empresas Genética Pecuaria Nazareno, Agropecuaria Melena del Sur y Agropecuaria Batabanó la adopción de prácticas productivas amigables con el ambiente.
3. Fortalecer y priorizar el Programa Conservación y Mejoramiento de suelos, con prioridad en las entidades: CCS 13 de Marzo, UBPC Reynaldo Lago y CCS Menelao Mora, UBPC Ciro Redondo, UBPC Hermanos Gómez CCS Reynaldo Lago fundamentalmente.
4. Capacitar a los técnicos agrícolas y productores con entidades en las áreas de recarga, teniendo en cuenta ajustar el régimen de riego a la variable NR (números de riego) de la metodología empleada.
5. Disminuir los niveles de degradación debido principalmente a la práctica de actividades productivas con enfoque agroecológico.

#### *Acciones de desarrollo urbano*

1. Entregar a la Dirección Municipal de Planificación Física los mapas temáticos realizados, así como el mapa resultante con las principales áreas de recarga hídrica natural, para el desarrollo económico y social de la zona.
2. Regular el crecimiento de las zonas urbanas de manera sostenible.
3. Ejecutar el mantenimiento de las vías de acceso existentes, así como el estudio para la

implementación de las nuevas, teniendo en cuenta las áreas identificadas como potenciales del recurso hídrico.

#### *Acciones para el fortalecimiento de capacidades*

1. Crear y fortalecer las capacidades humanas e institucionales existentes, de tal modo que se asegure el cumplimiento de las medidas propuestas con la intervención de la comunidad
2. Proponer al Consejo Territorial de Cuencas Mayabeque, la inclusión de la cuenca hidrográfica Guara, en las cuencas de interés provincial
3. Establecer Proyectos de eje estratégico, que fundamenten las acciones anteriormente propuestas siempre con la participación local.
4. Desarrollar un Programa de Educación Ambiental con las comunidades y entidades sobre la cuenca de conjunto con el CITMA Provincial y los representantes municipales.

#### **4. DISCUSIÓN**

Al conocer la recarga potencial en la cuenca hidrográfica Guara se estima que el 13 y el 27% del área total con cobertura vegetal, se sustenta en polígonos con alta y muy alta recarga, el 55% poseen recarga media (estando cubiertos en su mayoría por bosques, pastos y el manglar, constituyendo este último, una barrera protectora contra la erosión costera) y los que aportan los menores volúmenes de agua al manto freático de forma natural representan el 5%.

La estimación del volumen que puede llegar al acuífero, muestra la influencia de la vegetación, se observa que el área de bosque recarga 186 mm/Km<sup>2</sup>, la de pastos 101 mm/Km<sup>2</sup> y el área de cultivos varios 89 mm/Km<sup>2</sup>, en la zona costera el proceso hidrodinámico que se produce entre el agua dulce y el agua salada no hace veraz este análisis demostrando que en los bosques se da una mayor evapotranspiración, pero la capacidad de regulación y almacenamiento de humedad que presentan los suelos cubiertos de bosques, y la alta tasa de infiltración de los mismos, producen volúmenes de recarga superiores.

La superposición del mapa resultante de las principales áreas de recarga hídrica natural, con los mapas de temáticos de suelos, vegetación, uso del agua, etc., permite puntualizar con mayor precisión los problemas ambientales de manera general así como, la solución de los mismos.

En cuanto a la cobertura vegetal se establece un índice de reforestación potencial que toma en cuenta la reforestación de la zona costera, las zonas de recarga hídrica, además de la faja de protección forestal de ríos y embalses, el que refleja que el 66%



del área de la cuenca admite plantaciones forestales en función de potenciar la disponibilidad del agua.

## 5. CONCLUSIONES

En la cuenca hidrográfica Guara que ocupa el 45% del área de su cuenca hidrogeológica siendo su principal fuente de alimentación, se identifican 29 polígonos biofísicos los que aportan como recarga potencial al acuífero el 33% de la precipitación que cae en la cuenca, a razón de 79 009.35m<sup>3</sup> al año, donde además, el 50% evapotranspira a través de la vegetación, el 15% se retiene en el follaje y el 2% se convierte en escurrimiento producto de las áreas urbanas.

La metodología de cálculo aplicada permite valorar la cuenca de forma integral, combinando variables del ciclo hidrológico, parámetros fisiográficos y efectos antrópicos, como elementos que rigen el balance hídrico, para la formación, almacenamiento y explotación del recurso agua, constituyendo su salida cartográfica un valioso instrumento de trabajo para la gestión ambiental, brindando los fundamentos esenciales para implementar una política de ordenamiento del territorio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcalá, G. y Francisco, J. (2005). Recarga a los acuíferos españoles mediante balance hidroquímico. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña España.

Barsev, R. (2008). Valoración económica de los bienes y servicios ambientales. Proyecto PNUD-GEF. Sabana-Camagüey.

Blanco Rojas, H. (2009). Identificación de las áreas de recarga hídrica en la parte media-alta de las microcuencas Palo, Marín y San Rafelito, Tesis de Maestría. Costa Rica.

Decreto Ley 138 de las Aguas Terrestres de 2 de julio de 1993. (1993). Gaceta Oficial de la República de Cuba. Extraordinaria No.9. Habana. Cuba.

EAHMY. (2013). Base de datos digitales de las Redes de observación hidrológicas, hidrogeológicas y de calidad de las aguas (Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Mayabeque).

Faustino, J. (2011). Importancia del Bosque- Agua. Manual Manejo Integrado de Cuencas (CATIE, Ed.).

García, J. M. (2007). Aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integrada de los recursos hídricos. Aproximación al caso cubano. Revista Voluntad Hidráulica No.99, pp. 2-17.

García, J. M. (2009). Aplicación del enfoque de sistema a la gestión integrada de los recursos hídricos en Cuba. Proyecto IWCAM – GEF.

García, J. M. y Fontova M. (2013). "La gestión integrada del recurso hídrico en la cuenca hidrográfica y medidas de adaptación al cambio climático". Revista Voluntad Hidráulica No.107, pp. 25-27.

Geocuba. (2013). Imágenes satelitales de Google. gvSIG 10.64. II Taller de Directores Técnicos. Cienfuegos.

Guerrero, E., De Keizer, O., y Córdoba, R. (2007). Aplicación del Enfoque Ecosistémico en la Gestión de los Recursos Hídricos. (UICN, Ed.). pp. 16.

González, L., Marrero, N., y Martínez, J. B. (1999). Hidrología. (C. d. Hidráulicas, Ed.) La Habana: ISPJAE.

Hernández, A.; Pérez J. M., Bosch, D. y Rivero, L. (1999). Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. La Habana. Edit. AGRINFOR. 64 pp.

INRH. (1991). Esquema Regional Precisado.

INRH. (2010). Segunda Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Línea Base de Recursos Hídricos para el Ejercicio de Integración Sur LA Habana.

INRH. (2012). Procedimiento para la elaboración del Balance de Agua. Dpto. Uso Racional del Agua.

Junker Martín. (2005). Método RAS para determinar la Recarga de Agua Subterránea. El Salvador. FORGAES

Ley 81 del Medio Ambiente de 11 de julio de 1997. (1997). Gaceta Oficial de la República de Cuba Extraordinaria No.7. Habana. Cuba

Matus, O., Faustino, J., Jiménez. (2007). Metodología para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica en subcuencas hidrográficas. Validación en la subcuenca del río JUCUAPA. Nicaragua. CATIE.

NC 93-11/209."Procedimiento de cálculo para la determinación de las zonas de protección sanitaria".1990.

Orozco, E., Padilla, T. y Salguero M. (2003). Manual Técnico para la determinación de áreas de recarga hídrica natural. Guatemala, 2003.

Plaza, I. (2010). Manual Práctico de campo. Hidrogeológico. (INRH, Ed.) GEARH. Dirección Técnica. La Habana.

Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un Balance de suelos. Revista Geológica de América Latina. Universidad de Costa Rica. CATIE.