Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Hidráulica

TRABAJO DE DIPLOMA

TÍTULO

Caracterización de las aguas subterráneas de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana para el riego.

Autor: Rafael Silot Ochoa

Tutor: Ing. Esp. Manuel Boza Ramón

Msc. Rafael Matamoros García

Santa Clara

Curso 2016- 2017

"Año 59 de la Revolución"

PENSAMIENTO

"(…) sería bueno que nuestra población tuviera una mayor información sobre todos esos temas como factor que ayude a una mayor conciencia de la importancia de la agricultura, de la agricultura científica, de la agricultura productiva, de la agricultura que preserve el suelo, de la importancia del agua, el cuidado del agua, la preservación del agua; sería bueno que nuestra población tuviera una mayor conciencia de estos problemas. (…)"

Fidel Castro Ruz

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi madre, mi padre, mis hermanos, mis abuelos que nunca dudaron ni un segundo, a mi familia en general que siempre supo apoyarme en los momentos más difíciles de mi carrera, aquellas personas que confiaron en mí para que hoy pueda ser un hombre de bien.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mi madre, a mi padre, a mis hermanos, a mis abuelos, en general a toda mi familia que siempre confiaron en mí e hicieron posible que esto sucediera.

A mis profesores que sin pedir nada a cambio de una forma u otra depositaron su confianza.

A mis tutores Manuel Boza y Rafael Matamoros que siempre me ayudaron, me apoyaron y me dieron grandes consejos para la realización de la tesis.

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo la caracterización de las aguas subterráneas de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana. De las cuales se tuvieron en cuenta la caracterización de los pozos de abasto según el suelo, la geología, hidrología y la hidrografía a partir de documentos archivados en la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Cienfuegos. El estudio de las aguas se efectuó en el laboratorio de Recursos Hidráulico mediante análisis físico-químico, de los cuales se compraron con las normas cubanas NC 1021: 2014 "Higiene Comunal- fuentes de abastecimiento de agua-calidad y protección sanitaria" y la NC 827:2012 "Agua potable-requisitos sanitarios". Se utilizó para la mapificación de los resultados obtenidos una base de datos en el Excel. Se procesaron los resultados obtenidos a través de un sistema de información geográfica para de forma ilustrativa y espacialmente mejorar la interpretación. Las coordenadas de los pozos son ploteadas en el software ArcGIS donde se colocaron los datos para elaborar mapas temáticos atendiendo en cuenta el RAS corregido, el pH, el carbonato, el bicarbonato, la conductividad eléctrica, el contenido de sales en el agua, el carbonato sódico residual, porcentaje de sodio residual, la salinidad efectiva y salinidad potencial donde es posible de forma rápida ilustrar territorialmente los valores de los indicadores de la calidad de las aguas, utilizando el modelo matemático natural neighbors (vecino natural) aplicando ponderaciones, basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor que podrá emplearse para exponer situaciones con mayor claridad.

ABSTRACT

The objective of the research was to characterize the groundwater of the hydrogeological basin CF1 Hanábana. Of which the characterization of the wells of supply according to the soil, the geology, hydrology and hydrography were taken into account from documents filed in the Company of Hydraulic Utilization Cienfuegos. The study of the waters was carried out in the laboratory of Hydraulic Resources by means of physical-chemical analysis, of which they were bought with the Cuban norms NC 1021: 2014 "Communal Hygiene - sources of water supply quality and sanitary protection" and the NC 827: 2012 "Drinking water-health requirements". It was used for the mapping of the results obtained a database in the Excel. The results obtained through a geographic information system were processed to illustratively and spatially improve interpretation. The coordinates of the wells are plotted in the ArcGIS software where the data were placed to elaborate thematic maps taking into account the corrected RAS, pH, carbonate, bicarbonate, electrical conductivity, salt content in water, carbonate Residual sodium, percentage of residual sodium, effective salinity and potential salinity where it is possible to quickly illustrate territorially the values of water quality indicators, using the natural mathematical model neighbors (natural neighbor) applying weights, based on areas Proportional to interpolate a value that can be used to expose situations with greater clarity.

ÍNDICE

PENSAMIENTO II

DEDICATORIA III

AGRADECIMIENTOS IV

RESUMEN V

ÍNDICE VII

INTRODUCCIÓN 1

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTUDIO DE ANTECEDENTES. 8

1.1 El movimiento del agua subterránea y su composición química. 8

1.1.1 Contaminación de las aguas subterráneas en el mundo 10

1.1.2 Alteraciones físicas del agua 16

1.1.3 Alteraciones químicas del agua 18

1.2 Característica de las aguas subterráneas en Cuba 31

1.2.1 Características de las aguas subterráneas en Cienfuegos 33

1.3 Generalidades sobre los Sistema Información Geográfica (SIG) 34

Conclusiones parciales: 39

Capítulo 2: Materiales y Métodos. 40

2.1. Caracterización de los pozos de abasto de la cuenca hidrológica CF1 Hanábana 40

2.2. Evaluación de los resultados de la calidad de agua de la cuenca CF1 Hanábana. 47

2.3. Interpretación de los resultados obtenidos de muestras recogidas en el campo. 48

Conclusiones Parciales 49

Capítulo 3: Resultados y discusión 49

Conclusiones..... 59

Recomendaciones..... 61

Bibliografía: 62

ANEXOS 66

INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas tienen una amplia distribución territorial y son asequibles de forma relativamente fácil, económica, segura y adaptable al desarrollo y crecimiento de las necesidades, a partir de este recurso estratégico es necesario la creación de mapas temáticos para su interpretación química, es parte del sistema integrado de la gestión hídrica, y elemento esencial del medio ambiente, de ahí su relevante papel para la sociedad.

El agua subterránea es de esencial importancia para nuestra civilización porque supone la mayor reserva de agua potable en las regiones habitadas por los seres humanos. Puede aparecer en la superficie en forma de manantiales, o puede ser extraída mediante pozos. En tiempos de sequía, puede servir para mantener el flujo de agua superficial, pero incluso cuando no hay escasez, es preferible utilizar agua subterránea porque no tiende a estar contaminada por residuos o microorganismos. Aunque el agua subterránea está menos contaminada que la superficial, la contaminación de este recurso también se ha convertido en una preocupación en los países industrializados (Valencia, 2014). Las aguas subterráneas constituyen la mayor reserva de agua dulce del mundo, y representan más del 97% del total de agua dulce disponible en el planeta, excluyendo los glaciares y los casquetes polares. El 3% restante corresponde esencialmente a las aguas superficiales-lagos, ríos, humedales y a la humedad del suelo (HerraízL, 2009).

Hasta fechas recientes, la atención dirigida hacia las aguas subterránea se centraba, por un lado, en su uso como agua potable. Alrededor del 75% de los residentes de la Unión Europea (UE) dependen de las aguas subterránea para el abastecimiento de agua potable. No obstante, cada vez es más obvio que no deben considerarse a las aguas subterráneas únicamente como una reserva de agua, sino que deben protegerse también por su valor ambiental. Las aguas subterráneas son fundamentales para el ciclo hidrológico y su papel es básico para el mantenimiento de los humedales y de los caudales de los ríos y como los amortiguadores de los efectos de sequías. Es decir, las aguas subterráneas aportan el flujo básico, el agua que nutre a los ríos durante todo el año a los sistemas de agua superficiales, muchos

de los cuales sirven para el abastecimiento de agua y para usos recreativos. (María Paula Collazo Caraballo, 2012).

Las aguas subterráneas son predominantemente un recurso renovable que, cuando se gestiona adecuadamente, garantiza un abastecimiento a largo plazo que contribuya a atender las crecientes demandas y a mitigar los impactos del cambio climático previsto (Bellino, 2012).

La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1,386 millones de km^3, de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, es decir 35 millones de km^3, es agua dulce. De esta cantidad casi el 70% no está disponible para consumo humano debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo (Marín, 2014). De toda esta cantidad sola una mínima fracción el 6% es el tipo de líquido que podemos aprovechar mejor (Mundo, 2015). Del agua que técnicamente está disponible para consumo humano, sólo una pequeña porción se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos subterráneos relativamente poco profundos, cuya renovación es producto de la infiltración. Mucha de esta agua teóricamente utilizable se encuentra lejos de las zonas pobladas, lo cual dificulta o encarece su utilización efectiva (Agua, 2011).

La India, donde se riegan casi 50 millones de hectáreas con aguas subterráneas, en comparación con los 17 millones de hectárea que se riegan con aguas superficiales, y se extraen más de 200 km^3 de agua al año, ha pasado a ser un exportador importante de alimentos (Andrés Sahuquillo, 2015).

Los recursos hídricos de un territorio dado (país, provincia, cuenca, etc.) y en un intervalo de tiempo determinado pueden ser clasificados como: potenciales, cuando se refiere al volumen total de agua que ingresa por medio del escurrimiento superficial y la infiltración de las aguas de lluvias caídas directamente en el territorio, así como las cantidades de agua que fluyen desde territorios y acuíferos vecinos; aprovechables, aquellos que pueden llegar a ser manejados y controlados de forma sostenible, luego de considerados los recursos necesarios para la conservación de la vida acuática, la protección del propio recurso hídrico, etc., así como los que no presentan la calidad necesaria para el aprovechamiento Disponibles o Recursos

Hidráulicos, aquellos que realmente se controlan para su uso en la economía, la sociedad y la protección del medio ambiente, a partir de la infraestructura hidráulica creada a tal efecto (Valdés, 2011).

Según el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos en el 2013, nuestro país cuenta con recursos hídricos potenciales y aprovechables que pueden ser como:

Los Recursos Hídricos Potenciales del archipiélago cubano se evalúan, desde hace más de una década, en un total de 38138 millones de metros cúbicos anuales. De ellos, 6456 millones son subterráneos distribuidos en 165 unidades hidrogeológicas y los restantes 31682 son superficiales, distribuidos en 632 cuencas hidrográficas. Sin embargo, los resultados del estudio pluvial para la elaboración del actual Mapa Isoyético de Cuba 1961 – 2000, indican que estos recursos potenciales son probablemente más bajos.

Los Recursos Hídricos Aprovechables se evalúan en alrededor de 23888 millones de m^3 anuales, correspondiendo 17894millones (75%) a las aguas superficiales y 5994millones (25%) a las subterráneas.

Con el desarrollo hidráulico alcanzado, principalmente entre los años 1960 y 2000 en que la capacidad de embalse se ha elevado alrededor de 200 veces, los Recursos Hidráulicos a disposición de las demandas económicas, sociales y ambientales del país, ascienden a 13728 millones de metros cúbicos anuales (9233 millones superficiales y 4495 millones subterráneos), equivalentes al 57% de los Recursos Aprovechables (INRH, 2013).

Sin embargo, la relación entre los Recursos Disponibles y los Aprovechables varía territorialmente. Así puede observarse, por ejemplo, que la provincia de Guantánamo, donde se concentran los mayores Recursos Aprovechables del país, presenta sólo un 10% de éstos como Recursos Disponibles, mientras que, en el caso de Ciego de Ávila, esta relación se eleva al 86% (Redonda, 2013).

Alrededor del 67% del territorio cubano, corresponde a complejos de rocas carbonatadas, en gran medida carsificadas y con un alto grado de acuosidad. Un 11% corresponde a rocas cársicas también acuíferas y con una acuosidad variable.

En estas zonas carsificadas se localizan las 165 cuencas, zonas y tramos hidrogeológicos más importantes, los cuales cuentan con abundantes recursos y un área acuífera efectiva elevada. En 86 de estas cuencas se almacena el 77% del volumen total de agua subterránea (CITMA, 2013).

Un factor de suma importancia es también la condición de insularidad de Cuba, que determina una interacción permanente con las aguas marinas y costeras, equilibrio que puede afectarse por causas antropogénicas, aumentando el contenido salino en aguas subterráneas y superficiales. De las 86 cuencas con mayor almacenamiento 70 son abiertas al mar, presentando problemas de intrusión salina marina. La recarga o alimentación de los acuíferos se produce en el período lluvioso. Se infiltra como promedio entre el 20 y el 40% del total de lluvia caída, aunque hay zonas cársicas con valores superiores (Palacio, 2010).

En el caso particular de Cuba, los recursos hídricos subterráneos son una importante fuente de abastecimiento pues alrededor del 30% del recurso hídrico en explotación total en el país y más del 70% del abasto a la población, es de origen subterráneo. Su rápida utilización y bajo costo de inversión y explotación, en comparación con las obras hidráulicas superficiales están asociados, fundamentalmente, a las siguientes razones:

- Alta representatividad de las rocas calizas carsificadas, muy permeables y con una conductividad hidráulica grande.
- Gran espesor saturado de rocas calizas, generalmente hasta cientos de metros, lo que garantiza una columna de agua más que suficiente para la explotación y volúmenes almacenados como reservas.
- Poca profundidad al agua, con menos de 25 m en el 90% de las unidades hidrogeológicas.
- Altos caudales o gastos de los pozos, generalmente más de 100 l/s, con abatimientos muy pequeños.
- Poca profundidad de los pozos (generalmente de 50 - 60 m) para lograr caudales de múltiples usos; o sea, menos costo de perforación

- Poca complejidad en la perforación, generalmente con encamisado en la zona de suelo y sin camisa en la zona de calizas, por ser rocas duras.

Es necesario conocer la distribución geográfica de los recursos naturales, poder cuantificarlos, e interpretar su potencial, es uno de los requisitos básicos de la planificación, orientada al desarrollo territorial (Muehrcke, 2002).

Los mapas proporcionan la información de las aguas subterráneas a las que caracterizan química y físicamente. Estos mapas sirven de herramienta para la toma de decisiones de carácter puntual o para idear soluciones alternativas e integradoras (CUTRO, 2015).

Es por ello que para dar cumplimiento al artículo 27 de la Constitución de la República la cual dispone que para asegurar el bienestar de los cubanos, el Estado y la Sociedad protegen la naturaleza y que para lograr estos objetivos se haya puesto en vigencia la Ley 33/81 de la Protección del Medio Ambiente y Uso Racional de los Recursos Naturales y poniendo en práctica el lineamiento 133 de la Resolución sobre los Lineamientos de la Política Económica y Social del Partido y la Revolución acordado en el VI Congreso del Partido comunista de Cuba, nos planteamos el siguiente problema:

Problema

¿Cómo determinar la calidad de las aguas subterráneas para la utilización de riego a partir del empleo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la cuenca CF1 Hanábana?

Hipótesis

Si se logra representar la distribución espacial de la calidad de las aguas en la cuenca CF1 Hanábana, se podrá ilustrar territorialmente su comportamiento y permitirá la toma de decisiones de las, entidades e instituciones encargadas de poner en práctica las leyes, decreto ley, reglamentos, normas o directivas que permitan preservar la calidad de sus aguas en su uso para el riego.

Objetivo General

Elaborar los mapas temáticos de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana para la interpretación química de las aguas subterráneas en vista al riego.

Objetivos específicos:

- Establecer el estado de arte en la temática de investigación.
- Caracterizar los pozos de abasto de agua subterránea de la cuenca CF1Hanábana.
- Evaluar los resultados químicos de las aguas subterráneas de la cuenca CF1 Hanábana.
- Interpretar los resultados obtenidos a través de muestras recogidas en el campo.

Objeto de estudio

Interpretación de los indicadores de la calidad del agua a través de mapas temáticos.

Campo de investigación

Evaluación de la calidad de las aguas subterránea de la cuenca CF1 Hanábana.

Tareas Investigativas

- Determinación de los pozos de abasto de aguas subterráneas CF1 Hanábana.
- Representación de los resultados químicos del agua subterránea de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana mediante el programa ArcGIS versión 10.1.
- Dar a conocer los resultados expuestos en los mapas temáticos de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana, basada en las normas cubanas de calidad de las aguas subterráneas.

Resultados esperados

- La elaboración de los mapas temáticos que permitan la interpretación y correlación de las aguas subterráneas de cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana.
- ¿Dar a conocer los diferentes indicadores químicos de las aguas subterráneas de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana y sus fuentes contaminantes para el riego?

La investigación contará con la siguiente estructura:

Capítulo I: Revisión bibliográfica y estudio de antecedentes.

En este capítulo se hace una revisión sobre el estudio del arte de los diferentes aspectos a tener en cuenta sobre la utilización de las aguas subterráneas a nivel mundial como nacional.

Capítulo II: Materiales y Métodos

En este capítulo se obtendrá valores de la muestra de agua tomada en el campo de los cuales se procesarán en una base de datos en Excel, del cual se exportará hacia el software ArcGIS a través del modelo matemático natural neighbors para la modelación de los mapas temáticos.

Capítulo III: Resultados de la investigación

Se mostrará los mapas temáticos obtenidos del software ArcGIS, de los cuales se comparan con las normas vigentes cubanos y estudios realizados para la clasificación de las aguas subterráneas.

CAPÍTULO 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTUDIO DE ANTECEDENTES.

El agua es esencial para mantener la vida y el equilibrio ecológico de nuestro planeta; es indispensable para el mantenimiento de las funciones de los organismos y de los ecosistemas, es el componente principal de todos los seres vivos, el medio para transportar materia en el ambiente y facilitar el flujo de energía a través de las circulaciones oceánica y atmosférica.

El recurso hídrico se requiere para la producción de alimentos, para cubrir las necesidades de agua potable de las poblaciones humanas, para la higiene personal y la producción industrial y pesquera. Los ríos, lagos y ecosistemas adyacentes (Beven, 2000) también proporcionan estos servicios, que incluyen el control de inundaciones, el transporte de personas y de bienes, recreación, purificación de aguas residuales municipales e industriales, generación de energía y hábitat para plantas y animales acuáticos (Acton, 2000; Bell, 2000).

1.1 El movimiento del agua subterránea y su composición química.

El agua de lluvia es la fuente primaria de la recarga hidrológica de los acuíferos. Ésta toma del suelo una determinada composición química antes de pasar a formar parte del agua de un acuífero. A partir de este momento, el agua circula por el interior del terreno, surgiendo en superficie, unas veces con un recorrido relativamente corto y otras con un recorrido de cientos de kilómetros (Anon., 2017).

El tiempo de contacto del agua con las rocas del acuífero es muy variado, tanto mayor cuanto más elevada sea la profundidad y menor la permeabilidad. Por esta razón las aguas profundas suelen ser más salinas que las más próximas a la superficie. Las aguas que circulan próximas a la superficie apenas interaccionan con el terreno y mantienen la configuración adquirida durante la infiltración. Las aguas subterráneas al volver a la superficie encuentran un ambiente muy diferente que puede alterar su composición, como sucede con las aguas procedentes de ambientes reductores que pierden el hierro disuelto precipitando hidróxido férrico. El caso más llamativo de estas precipitaciones en las surgencias, es la formación de potentes espesores de tobas calcáreas (travertinos) en las zonas de descarga de los

acuíferos calizos y dolomíticos. Al salir las aguas al exterior pierden CO_2 y se sobresaturan en $CaCO_3$, que se deposita alrededor de las plantas acuáticas originando las masas de travertinos (Juan Antonio López-Geta, 2009).

Sus propiedades físicas, tales como la textura del suelo (porcentaje de arena, limo y tamaño de las partículas de arcilla presentes) y la profundidad a que se encuentra la capa que impide la infiltración hacen posible o no la percolación de las aguas hacia capas interiores hasta llegar al acuífero. Las actividades de organismos más grandes que viven en el suelo, tales como lombrices y hormigas, también ayudarán a mejorar la infiltración de agua (Paramio, 1995).

Los indicadores a ilustrar para su interpretación son:

Dureza- La dureza total está determinada por la cantidad de calcio y magnesio (Ca^{2+}y Mg^{2+}) presente en el agua. La dureza se expresa en grados hidrométricos franceses.

$$Dureza = \frac{(Ca \times 2{,}5) + (Mg \times 4.12)}{10}$$

Fórmula 1 cálculo de dureza

Presión osmótica (Po)- Se estima la concentración total de sólidos disueltos (TSD) expresada en mg. l^{-1}, multiplicando la CE por un factor de 640 según Sparks (1995). Conociendo este valor se estima el PO aplicando la ecuación de Besler, McNeal y Cartel (1982), la cual se refleja a continuación.

S. T= C.E X 0,64 / 1000 Fórmula 2 cálculo del residuo o sólidos totales

C.E expresado en µS. cm^{-1}

S.T expresado en $g.l^{-1}$

Po (atm) = C.E (mS. cm^{-1}) x 0,36

C.E expresado en mS. cm^{-1}

Po expresado en atmósfera

Porcentaje de sodio posible (PSP)- Es la cantidad de sodio que resultaría después de que precipite el Ca CO_3, Mg CO_3 y el $CaSO_4$. Con este fenómeno dichos compuestos tienden a aumentar relativamente la proporción del sodio sobre los demás cationes. Se calcula mediante la fórmula:

$PSP= (Na^{+}/ SE) * 100$ Fórmula 3 cálculo de porcentaje de sodio

SE- salinidad efectiva

Índice de Saturación Langelier (ISL)- Es un modelo de estabilidad con aplicaciones industriales que mide el estado de equilibrio del agua en relación con su carácter incrustante o corrosivo. Se define como:

ISL= pH - pHs Fórmula 4 cálculo de saturación de las aguas

Índice de Scott o coeficiente alcalinométrico- Relaciona el posible exceso de sodio respecto al cloruro y sulfato con el álcali para la planta. Los tres casos son:

Si $Cl^{1-} > Na^{1+}$ entonces $K_1 = (2040 / Cl^{1-})$ en $mg.l^{1-}$

Sino $Cl^{1-} > Na^{1+} < (Cl^{1-} + SO_4^{2-})$ $K_2 = (6,620 /2,6\ Cl^{1-} + Na^{1+})$

O $Na^{1+} > (Cl^{1-} + SO_4^{2-})$ $K_3= (662 /Na^{1+} - 0,32\ Cl^{1} — 0,43\ SO_4^{2-})$

1.1.1 Contaminación de las aguas subterráneas en el mundo

Las aguas subterráneas tienen una importancia muy grande en la vida de los individuos y en las comunidades de la tierra, importancia que con frecuencia no es apreciada o es desconocida por la sociedad. Este desconocimiento y la mala disposición de nuestros desechos como consecuencia de todas las actividades humanas hacen que este recurso se vea afectado o contaminado (Tiempo, 1998).

La contaminación del agua subterránea también puede ser debida a causas naturales, pero es el hombre quien más influye: cuando dispone los residuos sólidos urbanos que arrastra todo tipo de contaminantes orgánicos e inorgánicos, cuando las aguas residuales de los núcleos urbanos se vierten en los cauces de los ríos, con

todas las actividades industriales, mineras, agrícolas y de ganadería y en algunos países actividades nucleares (Porras Martín, et al., 1985).

La explotación incorrecta de las aguas subterráneas origina varios problemas. En muchas ocasiones la situación se agrava por el reconocimiento tardío de que se está deteriorando el acuífero, porque como el agua subterránea no se ve, el problema puede tardar en hacerse evidente. Los principales problemas son:

a) Por agotamiento del acuífero.

Un buen uso de las aguas subterráneas exige tener en cuenta que, en los lugares en que las precipitaciones son escasas, los acuíferos se van cargando de agua muy lentamente y si se consumen a un ritmo excesivamente rápido, se agotan. Cuando se produce explotación intensiva, sequía u otras causas que van disminuyendo el nivel del agua contenida en el acuífero se derivan problemas ecológicos.

Cuando estos acuíferos se encuentran en la costa, al ir vaciándose de agua dulce, van siendo invadidos por agua salada (intrusión) y queda inutilizados para el uso humano. En la costa mediterránea española prácticamente todos los acuíferos están afectados por este problema y necesitan una mejora urgente de su explotación o de sus sistemas de control y, en muchos casos, es imprescindible permitir que se recarguen de agua antes de seguir explotándolos.

b) Por contaminación de las aguas subterráneas.

Se suelen distinguir dos tipos de procesos contaminantes de las aguas subterráneas: los "puntuales" que afectan a zonas muy localizadas, y los "difusos" que provocan contaminación dispersa en zonas amplias, en las que no es fácil identificar un foco principal.

Actividades que suelen provocar contaminación puntual son:

- Lixiviados de vertederos de residuos urbanos y fugas de aguas residuales que se infiltran en el terreno.

- Lixiviados de vertederos industriales, derrubios de minas, depósitos de residuos radiactivos o tóxicos mal aislados, gasolineras con fugas en sus depósitos de combustible, etc.
- Pozos sépticos y acumulaciones de purines procedentes de las granjas.

Este tipo de contaminación sueles ser más intensa junto al lugar de origen y se va diluyendo al alejarnos. La dirección que sigue el flujo del agua del subsuelo influye de forma muy importante en determinar en qué lugares los pozos tendrán agua contaminada y en cuáles no. Puede suceder que un lugar relativamente cercano al foco contaminante tenga agua limpia, porque la corriente subterránea aleja el contaminante de ese lugar, y al revés (Pim, 1998).

La contaminación difusa suele estar provocada por:

- Uso excesivo de fertilizantes y pesticidas en la agricultura o en las prácticas forestales.
- Explotación excesiva de los acuíferos que facilita que las aguas salinas invadan la zona de aguas dulces, por desplazamiento de la interface entre los dos tipos de aguas.

Este tipo de contaminación puede provocar situaciones especialmente preocupantes con el paso del tiempo, al ir cargándose de contaminación, lenta pero continuamente, zonas muy extensas.

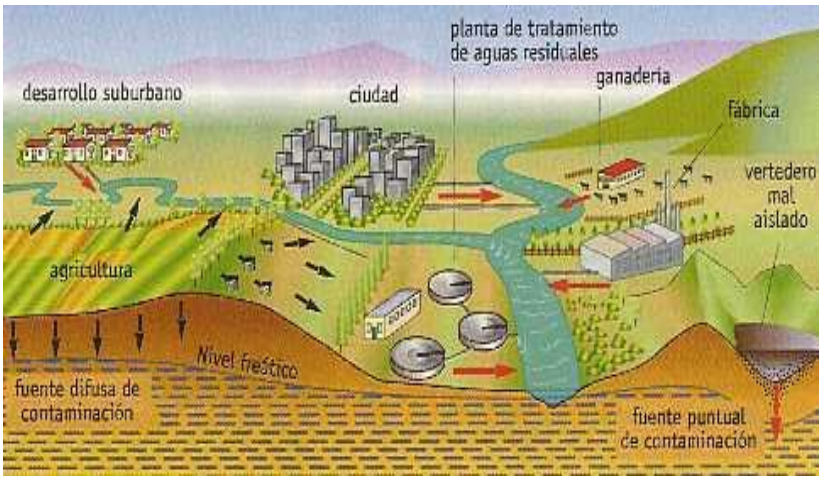


Figura 1: Fuentes puntuales y difusas de contaminación de las aguas subterráneas

Depuración

Los acuíferos tienen una cierta capacidad de autodepuración, mayor o menor según el tipo de roca y otras características. Las sustancias contaminantes, al ir el agua avanzando entre las partículas del subsuelo se filtran y dispersan y también son neutralizadas, oxidadas, reducidas o sufren otros procesos químicos o biológicos que las degradan. De esta manera el agua va limpiándose.

Cuando la estructura geológica del terreno facilita una zona amplia de aireación, los procesos de depuración son más eficaces. También es muy favorable la abundancia de arcillas y de materia orgánica. En cambio, en los depósitos aluviales o las zonas kársticas la purificación del agua es mucho más difícil y este tipo de acuíferos son mucho más sensibles a la contaminación.

Es muy importante, de todas formas, tener en cuenta que las posibilidades de depuración en el acuífero son limitadas y que el mejor método de protección es, por tanto, la prevención. No contaminar, controlar los focos de contaminación para conocer bien sus efectos y evitar que las sustancias contaminantes lleguen al acuífero son los mejores métodos para poder seguir disfrutando de ellos sin problemas.

Cuando un acuífero está contaminado y hay que limpiarlo el proceso es muy difícil y muy caro. Se han usado procedimientos que extraen el agua, la depuran y la vuelven a inyectar en el terreno, pero no siempre son eficaces y consumen una gran cantidad de energía y dinero.

La mejora general del bienestar humano en los últimos años ha venido acompañada de crecientes problemas de fragmentación y pérdida de hábitats, pérdida de biodiversidad, aumento de ciertos riesgos para la salud humana y crecientes niveles de contaminación del agua PNUMA (2008). La Evaluación de Ecosistemas del Milenio destacó que la capacidad de los ecosistemas de agua dulce para proporcionar fuentes limpias y confiables de agua se está deteriorando

aceleradamente en muchas partes del mundo (The Millennium Ecosystem Assessment, 2005). La urgente necesidad de restaurar y mantener los ecosistemas para proporcionar los servicios relacionados con el agua de los cuales dependemos, no puede ser exagerada.

La mayoría de las aguas de desecho, ya sean domésticas, industriales, agrícolas, pecuarias, etc., en México reciben tratamiento y se vierten directamente en los cuerpos de agua superficiales, lo que ocasiona la contaminación de estos.

En Uruguay la contaminación por nitratos es generalmente puntual o localizada vinculada principalmente a los criaderos de ganados, pero se hace difusa cuando deriva del excesivo uso de fertilizantes en las grandes extensiones y con riego excesivo (Paula María y Montaño, 2012).

La contaminación del agua subterránea por nitratos producto de la fertilización excesiva o de la inadecuada disposición de las aguas residuales, tanto industriales como domésticas constituye un problema de actualidad, no sólo en los países en vías de desarrollo, sino también en los llamados desarrollados. Las consecuencias asociadas a este deterioro pueden repercutir sobre la salud de las comunidades a corto, mediano o largo plazo, de aquí la necesidad de tomar medidas a fin de disminuir la polución por los mismos. Según algunos autores es el contaminante inorgánico más conocido y el que quizás genera mayor preocupación (Del Puerto *et al.,* 2008).

Países con afectaciones por nitratos

Líbano: la facultad de Salud Pública de la Universidad del Líbano (Halwani *et al.*, 1999), indica que el agua subterránea de la llanura de Akkar en el norte del país, que abastece con este tipo de agua a una población de alrededor de 75 000 habitantes, está seriamente contaminada con nitratos como resultado de la fertilización intensiva y que estos altos niveles de nitratos pueden tener efectos adversos sobre la salud de los habitantes, especialmente los niños.

Argentina: la contaminación de las aguas superficiales por nitratos deriva principalmente del vertido en ellas de las aguas residuales domésticas e industriales

y del escurrimiento directo de las aguas pluviales desde áreas agrícolas, con arrastre de fertilizantes nitrogenados (Sourdeaux, 2002).

Brasil: el núcleo de estudios para la salud colectiva de la Universidad Federal de Río de Janeiro publica un artículo donde hace referencia a las pobres condiciones sanitarias, déficit en la calidad de las aguas de consumo y enfermedades asociadas a la ingestión de aguas de alto contenido de nitrato (metahemoglobinemia) en países en vía de desarrollo (Freitas*et al.*, 2001).

Estados Unidos: la concentración de nitratos fue más alta en las tierras dedicadas a las cosechas comparadas con las dedicadas a otros usos (Casey R.E. y Klaine S.J., 2001), por otro lado, la producción de petróleo como la agricultura han impactado en la calidad de las aguas del sudeste del Gulf Coast Aquifer, en Texas (Hudak P.F. y Wachal D.J., 2001).

España: una investigación realizada por la Universidad de Valencia arroja que en más de 18 comunidades de Valencia los niveles de nitratos en las aguas estaban por encima de los 150 mg/l, con riesgos para la salud de los infantes (Vitoria M.I y Brines S.J., 1991).

India: las altas concentraciones de nitratos en las aguas de consumo son causa de severa Metahemoglobinemia, especialmente en los grupos de menos de 1 año (7%-27%). Puede afectar otros grupos de edades (Gupta *et al.,* 2000).

Canadá: los pesticidas y los nutrientes son transportados de las tierras agrícolas tratadas por las corrientes producto de la irrigación afectando la calidad de las reservas de agua (Cessna *et al.,* 2001). El nitrógeno procedente de los efluentes de drenaje de los sistemas locales de tratamiento de las aguas residuales domésticas, es causa frecuente de preocupación, producto de la contaminación por nitratos del agua potable suministrada y la eutrofización de las aguas costeras (McQuarrie *et al.,* 2001).

Eslovenia: el enriquecimiento de las aguas subterráneas y de los ríos por nutrientes (nitrógeno y compuestos del fósforo), es uno de los más severos problemas por los que atraviesa Europa y también Eslovenia (Drolc *et al*., 2001).

Bulgaria: la polución del agua por nitratos es potencialmente peligrosa y con riesgos para la salud. En un estudio realizado la acumulación de nitratos en el cuerpo de niños entre 12 y 14 años de edad que vivían en localidades expuestas al agua contaminada con nitratos fue significativamente más alta que en grupos no expuestos (Gatseva *et al.,* 2000).

Francia, Tailandia, Nueva Zelanda, entre otros han presentado afectaciones serias por nitratos (Tulopou *et al.,* 2001; Nebbache *et al.,* 2001; Sukreeyapong *et al.,* 2001; McLay *et al.,* 2001).

1.1.2 Alteraciones físicas del agua

Afectan el aspecto del agua y cuando flotan o se sedimentan interfieren con la flora y fauna acuáticas. Son líquidos insolubles o sólidos de origen natural y diversos productos sintéticos que son arrojados al agua como resultado de las actividades del hombre, así como, espumas, residuos oleaginosos y el calor (Anon., 2013).

Color

El agua no contaminada suele tener ligeros colores rojizos, pardos, amarillentos o verdosos debido, principalmente, a los compuestos húmicos, férricos o los pigmentos verdes de las algas que contienen. Las aguas contaminadas pueden tener muy diversos colores, pero en general, no se pueden establecer relaciones claras entre el color y el tipo de contaminación.

Olor y sabor

Compuestos químicos presentes en el agua como los fenoles, diversos hidrocarburos, cloro, materias orgánicas en descomposición o esencias liberadas por diferentes algas u hongos pueden dar olores y sabores muy fuertes al agua, aunque estén en muy pequeñas concentraciones. Las sales o los minerales dan sabores salados o metálicos, en ocasiones sin ningún olor.

Temperatura

El aumento de temperatura disminuye la solubilidad de gases (oxígeno) y aumenta, en general, la de las sales. Aumenta la velocidad de las reacciones del metabolismo,

acelerando la putrefacción. A efectos prácticos, puede considerarse que en los acuíferos existe una "zona neutral", de temperatura constante, por encima de la cual la influencia térmica más significativa es la de las variaciones diarias o estacionales de la temperatura ambiente. Por debajo de esa zona el factor preponderante es el gradiente geotérmico o variación de la temperatura con la profundidad que, en áreas continentales suele ser de 3ºC/100 m. La distribución espacial de temperaturas en un acuífero depende de la conductividad térmica e hidráulica del medio, de la relación longitud/profundidad de la cuenca, configuración del nivel freático, distribución de la temperatura ambiente respecto a las zonas de recarga y descarga. En cualquier caso, la temperatura de las aguas subterráneas es muy poco variable. Sin embargo, es un parámetro importante en lo que se refiere al control del quimismo de las aguas, en particular cuando entre áreas diferentes del acuífero existen notables diferencias de temperatura que pueden influir en la solubilidad de determinadas sustancias.

Materiales en suspensión

Partículas como arcillas, limo y otras, aunque no lleguen a estar disueltas, son arrastradas por el agua de dos maneras: en suspensión estable (disoluciones coloidales); o en suspensión que sólo dura mientras el movimiento del agua las arrastra. Las suspendidas coloidalmente sólo precipitarán después de haber sufrido coagulación o floculación (reunión de varias partículas).

Radiactividad

Las aguas naturales tienen unos valores de radiactividad, debidos sobre todo a isotopos. Algunas actividades humanas pueden contaminar el agua con isótopos radiactivos.

Espumas

Los detergentes producen espumas y añaden fosfato al agua (eutrofización). Disminuyen mucho el poder autodepurador de los ríos al dificultar la actividad bacteriana. También interfieren en los procesos de floculación y sedimentación en las estaciones depuradoras.

1.1.3 Alteraciones químicas del agua

La composición de un agua puede contemplarse desde diferentes puntos de vista: químico, bacteriológico, isotópico. Básicamente, nos vamos a centrar en la composición química, entendiendo por tal el conjunto de sustancias (generalmente inorgánicas) incorporadas al agua por procesos naturales. Las sustancias orgánicas incorporadas al agua, aunque frecuentes, aparecen en concentraciones por lo común mucho menores que los constituyentes inorgánicos (Giraldo, 2012).

La incorporación de los constituyentes al agua es debida a su elevado poder disolvente y a sus propiedades de combinación. Esta disolución comienza incluso antes de que se incorpore al sistema de flujo subterráneo propio de cada acuífero. Gases, aerosoles, polvo y sales diversas, presentes en la atmósfera, reaccionan con el agua marcando el primer esbozo del quimismo del agua de infiltración. La interacción con el suelo (capa edáfica), zona no saturada y acuífero aportará al agua su contenido iónico.

Además, se encuentra a veces, especialmente asociados a los yesos, la sal común y los sulfatos de sodio y magnesio. Minoritariamente, puede haber además carbonatos y sulfatos de manganeso, zinc, estroncio, etc... Los iones disueltos en las aguas subterráneas se suelen dividir en mayoritarios, minoritarios y trazas. Los iones mayoritarios son cloruro, bicarbonato, sulfato, calcio, magnesio, sodio y potasio. Eventualmente el nitrato puede ser mayoritario, aunque raramente es de origen natural. Los iones minoritarios son aquellos que se encuentran habitualmente formando menos del 1% del contenido iónico total. Los más importantes son: bromuro, yoduro, sílice, litio, estroncio, fosfato, nitrito, hierro, manganeso, aluminio, amonio, sulfuro, fluoruro. Los elementos traza son los que se encuentran en cantidades inferiores y que requieren técnicas muy resolutivas para su determinación. Son metales pesados y otros. Además de estos iones, pueden encontrarse, habitualmente como consecuencia de procesos contaminantes, plaguicidas, fenoles, hidrocarburos, detergentes. Así mismo, deben considerarse los gases disueltos, esencialmente anhídrido carbónico y oxígeno. Entre los parámetros físicos, es notable la importancia de la temperatura, densidad y conductividad.

Características físico-químicas de interés son el pH, residuo seco, alcalinidad, dureza, acidez. La secuencia normal de un agua de reciente infiltración es:

Ca > Mg > Na HCO3 > SO4 > Cl

después de un largo tiempo de residencia, se tiende a invertir a:

Na > Mg > Ca Cl > SO4 > HCO3

Ión cloruro

Si se exceptúan las evaporitas y rocas de origen marino, las rocas por lo común presentan escasa proporción de cloruros. Sin embargo, dada la elevada solubilidad de sus sales, éstos pasan rápidamente a la fase acuosa pudiendo alcanzar concentraciones muy altas. El agua de lluvia puede ser una fuente importante de ión cloruro, especialmente en zonas próximas a la costa, disminuyendo rápidamente tierra adentro. El ión cloruro no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es adsorbido significativamente ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de trazador casi ideal. La concentración de cloruros en aguas subterráneas es muy variable, desde menos de 10 mg/l a más de 3000 (LinkedIn Corporation , 2013).

Ión sulfato

El ión sulfato procede del lavado de terrenos formados en ambiente marino, de la oxidación de sulfuros que se encuentran ampliamente distribuidos en rocas ígneas y sedimentarias, de la descomposición de sustancias orgánicas, etc. Sin embargo, la disolución de sales sulfatadas (yeso y anhidrita fundamentalmente) representa el aporte cuantitativamente más importante de este ión a las aguas subterráneas. El comportamiento del ión sulfato puede desviarse significativamente del teórico predecible en base a los principios de su disolución, por su tendencia a formar iones complejos con Na y Ca y a incorporarse a procesos biológicos. El ión sulfato está sujeto a procesos de reducción, especialmente en presencia de bacterias y materia orgánica. En ambientes reductores, a pH menor que 7, la forma reducida estable es el H_2S, mientras que en soluciones alcalinas predomina el HS-. En aguas dulces, la concentración normal de sulfatos puede variar entre 2 y 150 mg/l. En aguas salinas,

asociado al Ca, puede llegar a 5000 mg/l; asociado al Mg y Na, en salmueras, puede alcanzar hasta 200.000 mg/l. Se determina por gravimetría, turbidimetría o cromatografía iónica.

Iones bicarbonato, carbonato y CO_2

El anhídrido carbónico disuelto en agua y los diversos compuestos que forma en ella juegan un importante papel en la química del agua. Se disuelve en el agua en función de su presión parcial (CO_2). Una parte permanece en disolución en forma de gas mientras otra reacciona con el agua para dar ácido carbónico que se disocia parcialmente para dar iones carbonato y bicarbonato. El CO_2 disuelto en agua procede fundamentalmente de la zona edáfica (respiración de organismos y descomposición de la materia orgánica) en la que alcanza presiones parciales del orden de 10-1 a 10-3 bar (0,0003 bar en la atmósfera exterior). La disolución de calizas y dolomías, potenciada por el aporte de CO_2 y/o ácidos orgánicos o inorgánicos, es otra de las fuentes principales de carbonatos y bicarbonatos. Aunque con velocidades de incorporación al agua mucho menores, la hidrólisis de silicatos es otro de los mecanismos que da lugar a la formación de estos iones. En aguas con pH inferior a 8,3, la mayoría de las aguas subterráneas naturales, la especie carbonatada dominante es el ión bicarbonato. En estas aguas la concentración suele variar entre 50 y 400 mg/l, aunque puede alcanzar valores de hasta 800 mg/l. Concentraciones de hasta 1000 mg/l pueden encontrarse en aguas pobres en Ca y Mg o en las que se producen fenómenos de liberación de CO_2 (reducción de sulfatos) en el acuífero. Está sujeto a complejos procesos de disolución - precipitación, por lo que es necesario analizarlo "in situ". Se determina por volumetría con HCl utilizando naranja de metilo como indicador (viraje de naranja a rosa)

Iones nitrato, nitrito y amonio

Los compuestos nitrogenados presentes en las aguas naturales están íntimamente relacionados con el ciclo del nitrógeno. La mayor parte del nitrógeno aparece en forma gaseosa en la atmósfera (78% en volumen); en forma oxidada constituye una relativamente importante fracción en los suelos y sustancias orgánicas (tejidos de animales o vegetales que lo extraen de la atmósfera para su metabolismo). En las

rocas, sin embargo, sólo se presenta como elemento minoritario. El nitrógeno puede aparecer en forma de NH_3, NH_4 y, por oxidación, estas formas reducidas pueden transformarse en NO^2 y, finalmente en NO^3 que es la forma más usual y estable. Los procesos de oxidación-reducción de las especies nitrogenadas en el agua están influenciados por fenómenos biológicos y, en consecuencia, los productos finales dependerán del número y tipo de organismos que intervengan en ellos. Generalmente el NH_4, o el amoniaco libre, aparecen sólo como trazas en aguas subterráneas, aumentando su concentración cuando el medio es fuertemente reductor. Este compuesto es el producto final de la reducción de sustancias orgánicas o inorgánicas nitrogenadas que naturalmente se incorporan al agua subterránea.

El ión nitrito puede estar presente en las aguas bien como consecuencia de la oxidación del NH_3 o como resultado de la reducción, microbiana o no, de los nitratos. Su presencia en el agua debe considerarse como un indicio fundado de una posible contaminación reciente (dada su inestabilidad) y, tal vez, de la impotabilidad del agua debida a la toxicidad de este ión. No obstante, la sola presencia de nitrito y amonio en el agua subterránea no debe ser considerada como resultado de una contaminación, sin analizar las posibles causas de su presencia, dado que en un acuífero las condiciones de oxidación no son siempre favorables y estos iones, incorporados de manera natural al acuífero, pueden mantenerse durante cierto tiempo en el equilibrio con su forma oxidada, el nitrato. Los nitratos pueden estar presentes en las aguas subterráneas bien como resultado de la disolución de rocas que los contengan, lo que ocurre raramente, bien por la oxidación bacteriana de materia orgánica. Su concentración en aguas subterráneas no contaminadas raramente excede de 10 mg/l.

El origen de los nitratos en las aguas subterráneas no siempre es claro. Son relativamente estables, pero pueden ser fijados por el terreno o ser reducidos a nitrógeno o amonio en ambientes reductores. A menudo son indicadores de contaminación alcanzando entonces elevadas concentraciones y presentando, por regla general, una estratificación clara con predominio de las concentraciones más

elevadas en la parte superior de los acuíferos libres. El tipo de contaminación a que es debida su presencia en el agua subterránea está relacionado con las actividades urbanas, industriales y ganaderas, y muy frecuentemente, con carácter no puntual, con las prácticas de abonados intensivos inadecuados con compuestos nitrogenados. Puesto que las plantas sólo pueden aprovechar el nitrógeno en forma de nitratos, el tipo de fertilizante aplicado condiciona la proporción de nitrógeno utilizable por las mismas y, en consecuencia, la cantidad no aprovechada por ellas que se infiltra hacia el acuífero. La concentración de nitrato en el agua de infiltración depende, pues, del tipo de fertilizante y, además, de la frecuencia, cantidad y modo de aplicación, así como del nitrógeno orgánico o inorgánico ya existente en el suelo, así como de su permeabilidad, grado de humedad, etc.

Ión calcio

Suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonatos (calcita, aragonito y dolomita) o sulfatos (yeso y anhidrita). Los controles de la concentración de calcio en el agua subterránea pueden resumirse en tres: equilibrio carbonático, aporte de H+ (función del aporte de CO_2) e intercambio iónico. El intercambio iónico ente calcio y otros cationes (sodio fundamentalmente), retenidos en la superficie de minerales con los que entra en contacto el agua, se potencia notablemente en terrenos arcillosos de baja permeabilidad. La concentración de Ca varía ampliamente en las aguas subterráneas. Concentraciones entre 10 y 250 mg/l son frecuentes en aguas dulces mientras que en aguas de terrenos y esíferos pueden llegar a 600 mg/l, y en salmueras hasta 50.000 mg/l.

Ión magnesio

Menos abundante que el calcio en aguas naturales, procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomías y calizas magnesianas), evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos, así como de agua marina. La solubilidad de la magnesita ($MgCO_3$) en las aguas subterráneas naturales es mayor que la de la calcita por lo que, en condiciones normales, el MgCO3 no precipita directamente de

la disolución de modo que, para un periodo dilatado de tiempo, puede producirse cierto grado de sobresaturación respecto a los diferentes carbonatos magnésicos. Los procesos de intercambio iónico influyen también en las concentraciones de magnesio en aguas subterráneas. En ellas, el magnesio es retenido con preferencia al calcio en suelos y rocas. En aguas naturales el contenido de ión magnesio no suele sobrepasar los 40 mg/l. En terrenos calcáreos pueden rebasarse los 100 mg/l y en terrenos evaporíticos pueden alcanzarse valores de 1000 mg/l.

Ión sodio

El sodio es liberado por la meteorización de silicatos tipo albita y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos en que se presenta fundamentalmente como NaCl. Una fuente importante de sodio la constituyen los aportes de agua marina en regiones costeras, tanto por intrusión marina como por infiltración del agua de lluvia a la que se incorpora desde el mar. Las sales de sodio son altamente solubles y tienden a permanecer en solución ya que no se producen entre ellas reacciones de precipitación, como ocurre en el caso del calcio. Sin embargo, el sodio puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de cambio catiónico y puede ser intercambiado con calcio provocando una disminución de la dureza de las aguas. La presencia de sodio en aguas naturales es muy variable pudiendo alcanzar hasta 120.000 mg/l en zonas evaporíticas; sin embargo, raramente sobrepasa 100 o 150 mg/l en aguas dulces normales.

Ión potasio

Procede de la meteorización de los feldespatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas, en particular de sales tipo silvina (KCl) o carnalita (KCl $MgCl_2$). El potasio tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en la superficie de minerales con alta capacidad de intercambio iónico. En aguas subterráneas no suele sobrepasar los 10 mg/l, a excepción de algunas salmueras. En ocasiones, más altas concentraciones pueden ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales.

Sílice

El origen fundamental de la sílice en el agua subterránea son los procesos de hidrólisis de feldespatos y silicatos en general. El cuarzo o la sílice amorfa, por su baja solubilidad, fuertemente dependiente de la temperatura, no son fuentes significativas del SiO2 del agua subterránea. Aunque la sílice disuelta suele representarse como SiO2, en la mayoría de las aguas naturales aparece como H4SiO4 monomérico que no comienza a disociarse hasta valores de pH superiores a 9, siendo su solubilidad prácticamente independiente del pH hasta dicho valor. Por lo general, el valor de SiO2 en agua subterránea sobrepasa los 3-8 mg/l.

Oxígeno disuelto OD1:

Las aguas superficiales limpias suelen estar saturadas de oxígeno, lo que es fundamental para la vida. Si el nivel de oxígeno disuelto es bajo indica contaminación con materia orgánica, septicización, mala calidad del agua e incapacidad para mantener determinadas formas de vida.

Su importancia deriva del hecho de su capacidad de oxidación de diferentes tipos de constituyentes que se encuentran en forma reducida y de modificar, en consecuencia, la solubilidad de los mismos. En último término, la fuente de oxígeno disuelto en aguas en contacto con el aire es la atmósfera. Una fuente indirecta es también el proceso de fotosíntesis. Aunque el oxígeno disuelto se puede consumir en procesos de oxidación de materia orgánica en la superior de la zona no saturada, su contenido en aguas subterráneas profundas puede ser notable. El contenido en oxígeno disuelto puede llegar incluso a valores de saturación: 13,3 mg/l a 10 ºC y 7,6 a 30ºC. Sin embargo, las aguas anóxicas son frecuentes.

PH

Las aguas naturales pueden tener pH ácidos por el CO_2 disuelto desde la atmósfera o proveniente de los seres vivos; por ácido sulfúrico procedente de algunos minerales, por ácidos húmicos disueltos del mantillo del suelo. La principal substancia básica en el agua natural es el carbonato cálcico que puede reaccionar con el CO_2 formando un sistema tampón carbonato/bicarbonato. Las aguas contaminadas con vertidos mineros o industriales pueden tener pH muy ácido. El pH

tiene una gran influencia en los procesos químicos que tienen lugar en el agua, actuación de los floculantes, tratamientos de depuración, etc.

Nitrógeno total

Varios compuestos de nitrógeno son nutrientes esenciales. Su presencia en las aguas en exceso es causa de eutrofización. El nitrógeno se presenta en muy diferentes formas químicas en las aguas naturales y contaminadas. En los análisis habituales se suele determinar el NTK (nitrógeno total Kendahl) que incluye el nitrógeno orgánico y el amoniacal. El contenido en nitratos y nitritos se da por separado.

Fósforo total

El fósforo, como el nitrógeno, es nutriente esencial para la vida. Su exceso en el agua provoca eutrofización. El fósforo total incluye distintos compuestos como diversos ortofosfatos, polifosfatos y fósforo orgánico. La determinación se hace convirtiendo todos ellos en ortofosfatos que son los que se determinan por análisis químico.

Aniones: indican salinidad

Cloruros: indican contaminación agrícola

Nitratos: indican actividad bacteriológica

Nitritos: indican detergentes y fertilizantes

Fosfatos: indican acción bacteriológica anaerobia (aguas negras, etc.)

Sulfuros, cianuros, fluoruros: indican contaminación de origen industrial en algunos casos se añaden al agua para la prevención de las caries, aunque es una práctica muy discutida.

Conductividad, residuo seco y total de sólidos disueltos

Como consecuencia de su contenido iónico, el agua se hace conductora de la electricidad. A medida que la concentración iónica aumenta, aumenta también hasta

cierto límite la conductividad. La unidad de medida es el uS/cm o umho/cm. La variación de temperatura modifica notablemente la conductividad. Se denomina residuo seco (RS) a las sustancias que permanecen después de la evaporación de un volumen determinado de agua, generalmente un litro, una vez eliminadas las que hubieran estado en suspensión. El total de sólidos disueltos (TSD) mide el peso de todas las sustancias disueltas en el agua, sean o no volátiles. No es exactamente igual al RS debido a procesos de deshidratación, pérdidas de CO2, etc. Que tienen lugar al calentar el agua a 110 ºC para obtener el residuo seco. Diversos factores (tipo de ión, grado de disociación, movilidad iónica, etc.) determinan que no exista una relación estrecha entre conductividad y RS o TSD. Los valores normales de conductividad en aguas dulces están entre 100 y 2000 uS/cm, en el agua de mar es del orden de 45.000 y en salmueras puede alcanzar los 100.000 uS/cm.

Alcalinidades TAC y TA

La alcalinidad de un agua determina su capacidad para neutralizar ácidos. Así, la alcalinidad TAC mide la capacidad de neutralización hasta pH=4,5 y la alcalinidad TA hasta pH=8,3. En la mayoría de las aguas naturales la alcalinidad está producida por los iones carbonato y bicarbonato, aunque en ocasiones, otros ácidos débiles como el silícico, fosfórico, bórico y ácidos orgánicos pueden contribuir de forma notable. El valor de TAC está comprendido por lo común entre 100 y 300 mg/l de $CaCO_3$, mientras que el de TA suele oscilar entre 0 y 10 mg/l de $CaCO_3$.

Contenido de sales en el agua (SST)

Uno de los aspectos más interesantes desde el punto de vista del riego es el contenido en sales del agua. Este contenido suele ser peligroso cuando pasa por encima de 1 $g.l^{-1}$, contabilizándose en esta cifra todos los iones existentes en el agua.

Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad se define como la facilidad con que una corriente eléctrica pasa a través del agua. La conductividad nos da una idea del contenido total de sales en el

agua. Cuanto más elevada sea la conductividad mayor será el contenido en sales. Las unidades de medida más frecuentes son milisiemens por centímetro ($mS.cm^{-1}$) y microsiemens por centímetro ($\mu S.cm^{-1}$).

1 $mS.cm^{-1}$= 1000 $\mu S.cm^{-1}$

1$dS.m^{-1}$ = 1 $mS.cm^{-1}$

1 $mho.cm^{-1}$= 1000 $milimhos.cm^{-1}$= 1000000 $micromhos.cm^{-1}$

1 $mS.cm^{-1}$=1 $milimho.cm^{-1}$

$\mu S.cm^{-1}$= 1 $micromhos.cm^{-1}$

Aguas de menos de 1,2 $mS.cm^{-1}$o 1200 $\mu S.cm^{-1}$no suelen plantear ningún problema, por el contrario, aguas con una conductividad por encima de 2,5 $mS.cm^{-1}$ o 2500 $\mu S.cm^{-1}$no son aconsejables para el riego.

Relación de absorción de sodio (RAS)

Para llegar a este indicador es necesario comenzar por el cálculo primario del RAS que es el valor que expresa la actividad relativa del ion sodio contenido en las aguas o en los extractos del suelo en las reacciones de intercambio con éste. Se refiere a la velocidad de adsorción de sodio en relación a los iones calcio y magnesio.

La fórmula para su determinación es:

$$RAS = \frac{Na^{+}}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+})+Mg^{2+}}{2}}}$$

Fórmula 5 cálculo de relación de absorción de sodio

Donde:

Na^{+} = contenido del ion sodio en el agua de riego, meq. l^{-1};

Ca^{2+} = contenido del ion calcio en el agua de riego, meq. l^{-1};

Mg^{2+} = contenido del ion magnesio en el agua de riego, meq. l^{-1}.

La importancia que presenta el análisis de este valor es que se considera que las relaciones que se establecen entre el agua de riego y los cultivos tienen como base un medio inerte que es el suelo. Sin embargo, la función de éste en la nutrición hídrica de las plantas depende en gran medida de su estructura física, de forma que la principal preocupación de un responsable de zonas de regadío es la conservación de los suelos y, en especial, de su capacidad de ser zonas de almacenamiento de agua, evitando que se degraden por el efecto de las sustancias que en ellos se vierten.

Después de un riego, la cantidad de calcio puede variar debido a la disolución o precipitación del calcio contenido en el agua del suelo, estableciéndose un nuevo equilibrio. La ecuación del RAS no tiene en cuenta estos cambios y puede dar resultados algo erróneos.

Para evitar estos inconvenientes Ayers y Westcot (1987) proponen una alternativa que ajusta la concentración del calcio en el agua al valor de equilibrio esperado después del riego, incluye, además, los efectos del dióxido de carbono, del bicarbonato y de la salinidad, sobre el calcio contenido inicialmente en el agua de riego y que no forma parte del agua del suelo. Este procedimiento se denomina Relación de Adsorción de Sodio Corregida (RAS^o) y supone la existencia de una fuente de calcio en el suelo como la caliza u otros minerales como los silicatos y la inexistencia de precipitación del magnesio.

El RAS^o corregido puede utilizarse para prever mejor los problemas de infiltración causados por concentraciones relativamente altas de sodio, o bajas de calcio, en las aguas de riego.

El RAS corregido se calcula mediante la siguiente expresión:

$$RAS° = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{(Ca^{2+})° + Mg^{2+}}{2}}}$$ Fórmula 6 cálculo de relación de absorción de sodio corregido

dónde:$(Ca^{2+})^0$ = contenido corregido del ión calcio en el agua de riego, meq. l^{-1}.

El valor de $(Ca^{2+})^o$ es el contenido del ión calcio en el agua de riego, corregido por la salinidad del agua (conductividad), por el contenido de bicarbonato en relación a su propio contenido de calcio (HCO^{3-}/Ca^{2+}) y por la presión parcial del dióxido de carbono ejercida en los primeros milímetros de suelo (P = 0,0007 atm.). Los valores de $(Ca^{2+})^o$ calculados en tablas (Ayers y Westcot, 1987) representan la concentración final del calcio que permanecería en disolución en el suelo, como resultado de aplicar un agua de determinada salinidad y contenido relativo de bicarbonato en relación al calcio (HCO_3^-/Ca^{2+}).

Carbonato sódico residual (CSR)

El cálculo de carbonato sódico residual (CSR) se emplea para predecir la tendencia del calcio y magnesio a precipitar en el suelo cuando se riega con aguas altamente carbonatadas. Cuando esto ocurre, aumentara la proporción relativa de sodio presente en el suelo, es decir, aumentara el valor de RAS y, por tanto, el riesgo de sodidificación del suelo, a pesar de que la cantidad presente de sodio no ha variado.

Se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$CSR= ([CO_3^{2-}]+ [HCO_3^-]) – ([Ca^{2+}]+ ([Mg^{2+}])$$

Fórmula 7 cálculo de carbonato de sodio residual

En la que los iones se expresan en miliequivalentes por litro (meq. l^{-1}).

Porcentaje de sodio intercambiable(PSI)

Es importante tener en cuenta el incremento de PSI del suelo para valorar la calidad de un agua destinada a riego, debido a los fenómenos de adsorción de sodio desde el agua por intercambio catiónico.

El PSI es el parámetro que mejor puede correlacionarse con la posible alteración del estado estructural del suelo (disminuyendo su permeabilidad) y con los efectos tóxicos en los cultivos debido al sodio. Por ello una evaluación racional del riesgo de sodicidad potencial de un agua debe realizarse en base a un parámetro que se

correlacione de forma satisfactoria con el PSI del suelo que resulta del riego con esa agua.

El RAS corregido es el que, aparentemente, mejor se correlaciona con el PSI del suelo, por lo que aparece como el parámetro más real de determinación del riesgo de sodicidad de un agua de riego.

La relación que vincula al RAS con el PSI es una recta de regresión empírica, válida para valores de RAS < 30, establecida por el equipo USDA (1954). Esta relación es la siguiente:

$$\mathrm{PSI} = \frac{100[-0{,}0126+0{,}01475.(\mathrm{RAS})]}{1+[-0{,}0126+0{,}01475.(\mathrm{RAS})]}$$ Fórmula 8 cálculo de porcentaje de sodio intercambiable

Salinidad efectiva (SE)

Si bien utilizan los mismos criterios de las clasificaciones del USDA, introducen un criterio modificatorio respecto de las clasificaciones americanas, atendiendo a la precipitación de ciertas sales cuando la solución del suelo va concentrándose, debido a la solubilidad diferencial de las sales. Sucede que sales poco solubles como sulfatos y carbonatos de calcio y magnesio, precipitan al aumentar la concentración de la solución y por lo tanto no contribuyen 20 a generar presión osmótica. Esta situación es importante cuando las aguas son ricas en carbonatos y bicarbonatos. El indicador que considera esta situación se denomina salinidad efectiva SE, con dimensión de me/l y se calcula de la siguiente manera:

Condición del agua	SE (meq. l^{-1})
1) Si $Ca^{2+} \geq (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$	$SE = \sum \text{cationes} - (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{-2})$
2) Si $Ca^{2+} \leq (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$)	Fórmula No 9 cálculo de salinidad efectiva
pero $Ca^{2+} \geq (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$	$SE = \sum \text{cationes} - Ca^{2+}$
3) Si $Ca^{2+} \leq (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4$	
pero $(Ca^{+2} + Mg^{+2}) \geq (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$	$SE = \sum \text{cationes} - (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$

4) Si $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) \leq (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ $SE = \sum cationes - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$

Salinidad Potencial (SP)

La Salinidad Potencial es un índice para estimar el peligro de la existencia de presencia de sales de cloruros y sulfatos en la solución que inciden en el aumento de la presión osmótica.

$SP=Cl^{-1}+1/2SO_4^{-2}$ en la unidad (meq. l^{-1}) Fórmula No 10 cálculo de salinidad efectiva

Clasificación de las aguas según Aceves y Palacios (1970):

SP: < 3; Aguas buenas para el riego

SP: 3 – 15; Aguas condicionales para el riego (debe mantenerse control sobre el comportamiento químico del suelo)

SP: > 15; Aguas no recomendables para riego

1.2 Característica de las aguas subterráneas en Cuba

En Cuba, la mayor parte de los acuíferos están desarrollados sobre rocas carbonatadas (calizas principalmente) carsificadas de la Cobertura Platafórmica del Neógeno. Vastas extensiones de las provincias de Pinar del Río, La Habana, Matanzas y Ciego de Ávila poseen este tipo de acuíferos con la particularidad de que, esencialmente, se trata de acuíferos litorales, en equilibrio precario con las aguas de mar de modo que se encuentran amenazados o afectados por la intrusión marina.

Alrededor del 67% del territorio cubano corresponde a complejos de rocas carbonatadas, en gran medida cársticas y con un alto grado de acuosidad (entre 10 y 300 l.s-1); 11% de rocas cársticas (o kársticas) también acuíferas, con una acuosidad variable entre 1 y 10 l.s-1; el complejo de rocas volcánicas abarca aproximadamente 15%, con una acuosidad baja de 1 l.s-1; 5,9% de rocas ultrabásicas, con una acuosidad media, presentan distintos gastos, hasta de 1 l.s-1. En zona de meteorización, de 5 a 10 l.s-1, y a veces más en las zonas de fracturas. El subsuelo

y los lechos fluviales del país lo constituyen, en su gran mayoría, rocas calizas y las dolomías o calizas dolomíticas, con contenido de sales que son capaces de disolverse en el agua con la que entra en contacto en virtud de todos los procesos de interacción entre agua y roca y del ciclo hidrológico (Fontova et al., 2012).

El desarrollo hidráulico cubano ha posibilitado utilizar el 57% de los recursos hídricos aprovechables, mediante la creación de la infraestructura técnica pertinente para incrementar en 200 veces la capacidad de embalse del país y lograr que el 96% de toda la población tuviese acceso al agua potable y el 95% al saneamiento (Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente, 2007).

Un informe emitido por los Ministerios de Salud Pública y el entonces Instituto de Hidroeconomía en marzo 1987 denominado “El problema de los nitratos en las aguas subterráneas de Cuba”, La Habana 1987, consideró que en las cuencas o las fuentes de abastecimiento de agua de casi todas las provincias existía afectación por nitratos y que las provincias con mayor afectación en relación con la contaminación por este elemento en fuentes de abasto de aguas subterráneas eran Camagüey, Las Tunas y en menor grado Cienfuegos y Holguín(Cañas *el al.,* 1992).

Un análisis comparativo de la demanda de agua asignada para las actividades agrícolas del Ministerio de la Agricultura (MINAG) de Cuba en el período comprendido entre el 2007 y el 2010 refleja que en el 2007 el agua total asignada para las actividades agrícolas del MINAG constituía el 36% (2157,120 hm^3del total del país mientras que ya en el 2010 y 2011 este porciento asciende a 44% (3521,524 hm^3) y 47% (4169,681 hm^3) respectivamente (INRH, 2011).Por su parte el área total bajo riego en el sistema productivo del MINAG es de 416 367 ha (Ministerio de la Agricultura, 2014). Del total de áreas bajo riego en el 2010, el 75% corresponden al riego por gravedad (41% con bombeo y 34 sin bombeo), el 19% a riego por aspersión (5% aspersión portátil, 8% semi estacionaria, 5% de pivotes eléctricos, 1% de máquinas de riego Fregat y el 0,1% a máquinas Voltzhankas), el 5% al riego localizado (4% por goteo, 1% por micro aspersión) y 2% a otras técnicas.

En la actualidad en la mayor reserva de agua potable subterránea de Santiago de Cuba. Los cursos de aguas de la cuenca se utilizan como desagüe de desechos de

la actividad humana doméstica, industrial, agrícola y ganadera. Existen 117 focos de contaminación de diversas instituciones estatales, además de los numerosos asentamientos humanos que vierten aguas albañales y desechos de todo tipo al cauce de la cuenca. A pesar de la evidente contaminación, las aguas del río San Juan son utilizadas para el regadío de cultivos (Naranjo *et al.,* 2005).

1.2.1 Características de las aguas subterráneas en Cienfuegos

Un informe emitido por los Ministerios de Salud Pública y el entonces Instituto de Hidroeconomía en marzo 1987 denominado “El problema de los nitratos en las aguas subterráneas de Cuba”, La Habana 1987, consideró que en las cuencas o las fuentes de abastecimiento de agua de casi todas las provincias existía afectación por nitratos y que las provincias con mayor afectación en relación con la contaminación por este elemento en fuentes de abasto de aguas subterráneas eran Camagüey, Las Tunas y en menor grado Cienfuegos y Holguín.

Los resultados señalaban un incremento paulatino de la concentración de los nitratos en fuentes de abastecimiento de agua que alcanzaban niveles superiores a la norma de concentración máxima permisible para Cuba que es de 45 mg/l. Según la doctora Regla Cañas, las concentraciones de nitratos en las aguas superficiales y subterráneas varían desde “cero” hasta más de 200 mg/l, según las condiciones geoquímicas, los procedimientos de evacuación de desechos humanos y animales, una intensa fertilización en áreas de riego, así como las descargas industriales de productos nitrogenados.

En Aguada de Pasajeros estudios realizados en el período 2007-2014 se reportaron afectaciones de nitratos, nitritos y coliformes por encima de las normas en las fuentes de abasto a la población según los resultados del laboratorio de la Empresa Nacional de Análisis y Servicios Técnicos del INRH certificada con la norma NC ISO: 2008 y los análisis basados en el libro “Standards Methods for the Examination of Water and Waste Water, Ed 20th, 1998” (ENAST, 2014).

Hanábana, donde se localizan los grandes planes arroceros, se acerca a la cota de alerta, y aunque se mantiene en régimen de entrega garantizada, la explotación

natural correrá riesgos si sobrepasa el balance planificado, con consecuencias similares a las de 2015, cuando fue necesario limitar las siembras del cereal. Porque al bajar mucho el nivel de las bombas, pudieran provocarse alteraciones físicas y en la concentración de algún elemento químico como el cloro, nitratos o magnesio, afectando los rendimientos hasta un 80 por ciento, como ha sucedido en otras ocasiones. Un uso normal, regulado, asegurará que se mantengan por debajo del nivel de alerta y cercano al de alarma.

Otras áreas tradicionalmente afectadas, serán aquellas donde habita el 40 por ciento de la población que se abastece directamente del manto: el norte de Lajas, el noreste de Rodas, y el Circuito Sur, perteneciente al municipio de Cumanayagua", detalló el experto.

En el macizo de Guamuhaya, la diminución de las precipitaciones en es un hecho. De acuerdo con el Resumen Climático Anual, los déficits de acumulados desde 2015, llegaron a ser más extremos en la zona montañosa donde más precipita históricamente. Es interesante el hecho de que el acumulado de estos dos meses es el más bajo desde 1980 hasta la fecha.

Ante la pertinaz ausencia de precipitaciones, el Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), comenzará a monitorear las fuentes contaminantes, anuncia el especialista, "porque no se trata de dejar de producir, sino hacerlo con responsabilidad. Un mal manejo de fertilizantes, por ejemplo, pudiera complejizar la situación de la sequía meteorológica, condenando fuentes para el consumo humano que tardarían en recuperarse tres décadas o más, como ocurrió en la localidad crúcense de Potrerillo" ·

1.3 Generalidades sobre los Sistema Información Geográfica (SIG)

La mayor parte de la de la información que manejamos en cualquier tipo de disciplina está georreferenciada. Es decir, que se trata de información a la cual puede asignarse una posición geográfica, y es por tanto información que viene acompañada de otra información adicional relativa a su localización (Olaya, 2012).

En este sentido, los SIG no son solo herramientas dentro de ese contexto de gran importancia de la información geográfica, sino en gran medida responsables de que esa situación sea tal, pues su contribución dentro del panorama relativo a la geografía ha sido vital para impulsar esta y hacerla llegar hasta su lugar actual. En una sociedad donde la información y la tecnología son dos de los pilares fundamentales, los SIG son, sin lugar a dudas, la tecnología estandarte para el manejo de información geográfica, y los elementos básicos que canalizan la gestión de todo aquello que, de un modo u otro, presente una componente geográfica susceptible de ser aprovechada (Laboratorio Unidad Pacífico Sur (CIESAS), 2010).

Básicamente, un SIG ha de permitir la realización las siguientes operaciones:

- Lectura, edición, almacenamiento y, en términos generales, gestión de datos espaciales.
- Análisis de dichos datos. Esto puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos, y puede llevarse a cabo tanto sobre la componente espacial de los datos (la localización de cada valor o elemento) como sobre la componente temática (el valor o el elemento en sí).
- Generación de resultados tales como mapas, informes, gráficos, etc.

En mayor o menor medida, un SIG siempre incorpora una serie de formulaciones que permiten la obtención de resultados y el análisis de los datos espaciales. Estas formulaciones representan procesos que pueden ser sumamente sencillos o enormemente complejos, y que pueden resultar de aplicación en uno u otro campo, o incluso con carácter general. Su origen puede ser muy variado, y no derivan necesariamente del ámbito puro de la geografía, sino que pueden ir desde simples consultas o mediciones a elaborados modelos que empleen datos de variables muy numerosas y arrojen resultados complejos. La estadística, entre otras ciencias, puede aportar al ámbito SIG muchas de sus ideas, y estas, adaptadas al marco de la información georreferenciada, constituir en el SIG un nuevo conjunto de procesos de análisis.

Las ventajas de la incorporación de todos estos procesos en una única herramienta, el SIG, van desde la automatización de tareas a la aparición de nuevos procesos

que, aprovechando la gran capacidad de cómputo de la plataforma en la que se ejecuta el SIG, producen resultados que no podrían ser obtenidos de otro modo. Bien sea por la complejidad propia de los procesos o por el nivel de precisión al que se trabaja, existen muchos procesos que mediante el uso de cartografía clásica y sin el apoyo de medios informatizados no pueden realizarse. El SIG abre un campo de actuación en el que la práctica totalidad de ideas y formulaciones de análisis pueden plasmarse y aplicarse con carácter práctico. Como herramienta para el manejo general de información geográfica, fundamental para trabajar hoy en día con todo tipo de información georreferenciada. Un SIG es un sistema compuesto por cinco piezas fundamentales: datos, tecnología, análisis, visualización y factor organizativo. Cada una de ellas cumple un papel determinado dentro del sistema SIG, el cual se caracteriza fundamentalmente por su naturaleza integradora (Anon., 2014).

Existen otras herramientas y tecnologías que pueden en principio asemejarse a los SIG, pero que realmente no comparten con estos su capacidad de integrar bajo un marco común una serie completa de elementos y disciplinas.

Tipos de Modelos de flujos

Existe una gran variedad de software numérico para la resolución de problemas asociados a las aguas subterráneas. Estos softwares permiten modelar desde problemas sencillos, como la evolución de plumas bidimensionales en condiciones ideales, hasta complejos problemas tridimensionales que se resuelven acoplados para flujo y transporte.

Según el Curso de Simulación de Acuíferos Subterráneos: Software para la modelación de Acuíferos, impartido en Villa Clara el 30 de enero al 3 de febrero por los profesores Lemuel C. Ramos Arzola y Félix Dilla Salvador.

Modelo WEAP: Es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas. WEAP tiene una amplia base de usuarios en todo el mundo y está disponible en diferentes idiomas, incluido el español.

Modelo MAGIC: (Modelación Analítica Genérica Integrada de Cuencas), deriva de un modelo simple y muy amigable, llamado MOS, al cual se le agregó la parte de modelación subterránea, también conceptualmente muy simple.

Modelo AQUATOOL: Es un modelo conceptual semi-agregado con el cual se pueden analizar de forma integrada, y a escala de cuenca hidrográfica aspectos cuantitativos, cualitativos, económicos y ambientales, incorporando también otros aspectos, como prioridades y reglas de gestión. Así mismo, permite tener toda la información en una sola aplicación, evaluar múltiples alternativas para distintos escenarios, obtener los intercambios entre los distintos objetivos, y estimar los riesgos asociados a las decisiones y al análisis de sensibilidad.

Flujo saturado

Modelo Modflow: (Modular Finite Difference Ground-Water Flow Model.

Emplea un [esquema en diferencias finitas] de bloques centrados para simular el flujo en la zona saturada. Es de fácil intercambio de datos en formatos comúnmente usados. Amplia experiencia de su utilización en todo el mundo. Un continuo desarrollo. Disponibilidad de su código fuente.

Flujo no saturado

Modelo Feflow (Finite Element Subsurface Flow):

Puede ser importante de modelar para casos donde sea relevante representar la conexión entre la hidrología subterránea y superficial a través de procesos como la infiltración y evapotranspiración. Poderosa interfaz gráfica. Fácil intercambio de datos en formatos comúnmente usados. Enfrenta complejas situaciones geométricas y paramétricas. Un continuo desarrollo.

Modelo AQÜIMPE: emplea el MEF con triángulo cuadrático. Simula el flujo impermanente en 2D (plano) en acuíferos libres o confinados. Simula la interacción entre un cuerpo de agua superficial y el acuífero subyacente. Simula el fenómeno de la intrusión salina utilizando una interfaz abrupta.

Modelo MADA (MATLAB): se utiliza para la obtención de patrones de extracción de un campo de pozos para:

Maximizar los niveles del agua subterránea.

Maximizar la capacidad de extracción.

Minimizar el costo de bombeo

Modelo GESCAL: fue desarrollado para la evaluación de la calidad del agua a nivel de cuenca. Para ello incluye el cálculo de todos los procesos de modificación de la calidad del agua tanto en tramos de río como en embalses y aplica este cálculo a cada elemento del esquema de la cuenca elaborado para Simges conectándolos entre ellos según el flujo de la cuenca. Aplicándolo a diferentes alternativas de decisión en la gestión de la cuenca permite evaluar las consecuencias en materia de calidad del agua que tiene para toda la cuenca cualquier decisión que se plantee.

Modelo EVALHID (Evaluación de los Recursos Hídricos): permite el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas**.** El módulo consta de varios tipos de modelos que se pueden escoger en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca y la práctica del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos. Todos los modelos disponibles son del tipo agregado con aplicación semidistribuida.

Para la realización de esta investigación utilizamos los programas ArcGIS versión 10.1. Estos permiten obtener los niveles de las aguas subterráneas en el tiempo y en cualquier lugar del acuífero. Pueden verificar la interacción entre cuerpos de agua subterráneos y superficiales. Pueden ayudar a evaluar el movimiento de sustancias contaminantes en el medio acuífero. Son una excelente herramienta para la evaluación de los recursos subterráneos. Es de fácil intercambio de datos en formatos comúnmente usados. Consta con una poderosa interfaz gráfica.

La principal función de los mapas es reflejar espacialmente las proporciones de los elementos analizados dando a entender de forma clara, donde se encuentran los mayores valores y así compararlos con las normas de consumo según el uso de las

mismas. Estos mapas son la continuación y final de los mapas temáticos de la provincia. Los mapas serán obtenidos bajo las fórmulas y normas vigentes a nivel internacional modelándose los mismos a partir de los resultados químicos de las muestras de las aguas subterráneas obtenidas en el laboratorio.

Conclusiones parciales:

¿Existen diferentes componentes químicos que permiten la clasificación de las aguas de acuerdo a su existencia como puede ser los iones de nitrato, nitrito, el calcio, el magnesio entre otros, de acuerdo a estos se puede decir con exactitud si el agua es aprovechable para el riego?

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) nos brindan grandes posibilidades a la hora de georreferenciar la información. Los cuales se puede hacer un análisis de dichos datos, se puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos, y puede llevarse a cabo la localización de cada valor o elemento como sobre la componente temática (el valor o el elemento en sí). Generando resultados tales como mapas, informes, gráficos.

El software ArcGIS es una herramienta fundamental para la modelación de mapas temáticos ya que gracias a estos podemos tener una aproximación del estado de los recursos hídricos que se encuentran en una cuenca o sector hidrogeológico, y así poder predecir el comportamiento de los mismos para próximos años.

Capítulo 2: Materiales y Métodos.

La cuenca CF1 Hanábana que se encuentra al noreste de la Provincia. De la cual su principal función el riego de arroz. La extensión de la cuenca es de 980,8 km^2, con un recurso dinámico de 244 hm^3 y 143 hm^3 de recurso explotable. La temperatura media anual es de 24^oC, la humedad relativa es de 81%, la precipitación anual oscila de 1300 a 1400 mm y los vientos predominantes son del noreste al sureste. Predomina un relieve llano. Las principales limitantes del suelo son el mal drenaje (8400 ha con esta problemática) (Anon., 2017).

El estudio es una investigación no experimental, donde se realizó en la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana, para el cual se recopila datos de los estudios hidroquímicos verticales (batometría) y los resultados de la calidad de las aguas subterráneas de la Red Cal facilitados por la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de la provincia de Cienfuegos, los mismos se procesaron del Excel formulando los distintos cálculos de los indicadores de calidad de las aguas, para posteriormente compararlos contra las normas vigentes: NC 1021: 2014 "Higiene Comunal- fuentes de abastecimiento de agua-calidad y protección sanitaria" y la NC 827:2012 "Agua potable-requisitos sanitarios"

Se procesaron los datos obtenidos a través de un sistema de información geográfica para de forma ilustrativa y espacialmente mejorar la interpretación. Las coordenadas de los pozos fueron ploteadas en el software ArcGIS donde se colocaron los datos para la elaboración de los mapas temáticos donde es posible de forma rápida ilustrar territorialmente los valores de los indicadores de la calidad de las aguas con una gama de colores definidas, elegir la simbología, el etiquetado y los rangos de escala, y configurar ventanas emergentes que presenten los atributos clave de las entidades del mapa.

2.1. Caracterización de los pozos de abasto de la cuenca hidrológica CF1 Hanábana

La caracterización del suelo, el clima, la geología, hidrología y la hidrografía se determinó a partir de documentos archivados en la Empresa de Aprovechamiento

Hidráulico Cienfuegos, (2014). El clima se caracterizará según la serie histórica que comprende el período 1986 al 2016 de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Cienfuegos y los datos brindados por el Departamento de Meteorología Cienfuegos.

Clima

Según el Departamento de Meteorología Cienfuegos (2016), por serie histórica cuenca CF1 Hanábana tiene una temperatura anual promedio de 24,6 ^{0}C, siendo los meses con temperatura mínima en el periodo seco, los meses de diciembre con 22 ^{0}C, enero con 20,9 ^{0}C y febrero con 21,9 ^{0}C, La temperatura alta se refleja en el mes de julio con 27 ^{0}C.

La humedad relativa anualmente es del 80 % oscilando entre el 73 % en abril y 85 % en septiembre.

La evaporación es de 2213 mm, los meses de mayor evaporación son: abril con 234,4 mm, seguido de mayo con 219,3 mm.

Las precipitaciones según resolución 4 de 2012 esgrime que la lluvia promedio anual es de 1516 mm, con un período seco de 287 mm y un periodo húmedo de 1229 mm. El mes con menor pluviometría es diciembre, seguido de febrero; los de mayor pluviosidad están en el mes de junio con 267 mm, seguido de septiembre con 224 mm (EAH, 2017).

Suelo y relieve

Se caracterizaron 17 pozos según Segunda Clasificación de Suelos por Hernández (1999) y mapas de suelos del Departamento de Suelo Provincial de Cienfuegos, (2014), de ellos 4 se encuentran enclavados en suelos Ferralíticos Rojos Típicos. 3 pozos se enclavan en suelos Ferralíticos Rojos Hidratados; 1 en suelos Ferralíticos Cuarcíticos Amarillos lixiviados gleysoso; 2 en suelos Pardos con Carbonatos concrecionarios; 1 en suelos Gley Amarillento Cuarcítico Típico; 2 en suelos Ferralíticos Concrecionarios y 4 en suelos Ferralíticos Amarillentos Típicos.

Geología

Para la evaluación de las fuentes de abasto se comprobaron las formaciones geológicas de Cienfuegos, la cual es variada como lo muestra la figura 2.

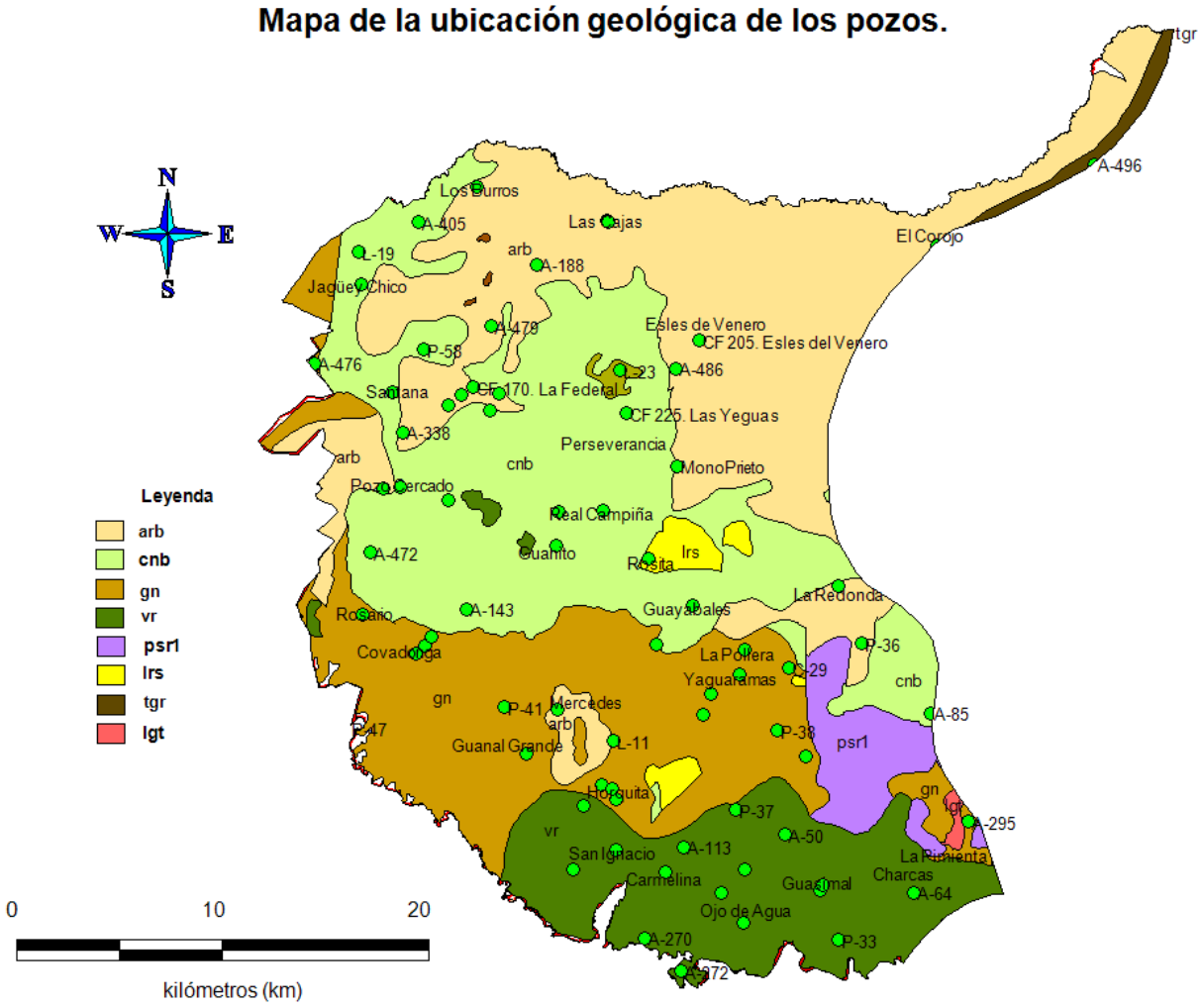


Figura 2. Mapa Geológico de la cuenca CF1 Hanábana.

Comportamiento geológico de la cuenca CF1 Hanábana.

Rocas del Cretácico

Estas rocas comprenden el 50 % del área de la cuenca en toda su porción norte y es caracterizada por dos tipos de formación geológica: Arabo y Cantabria.

La formación Arabo (arb) está formada por arcillas illito-montmorilloníticas calcáreas, abigarradas, con gránulos de cuarzo, concreciones calcáreas y ostreas, de colores crema, amarillento y gris verdoso; calizas arcillosas, calizas limosas,

margas, con raras intercalaciones de areniscas arcilloso-limosas amarillo-rojizas que pasan a limolitas arcillosas y calizas dolomitizadas. Las arcillas contienen a veces gravas polimícticas muy finas y gránulos de pirita. Estos sedimentos están distribuidos por toda la parte norte desde el poblado de Aguada de Pasajeros hasta el límite con las provincias de Villa Clara y Matanzas. De las cuales se encuentran los siguientes pozos (A-188, CF-170, P-50, CF-211, CF-205, A-486, A-479, A-338, CF-11, Mono Prieto, Agua de Pasajero, CF-17, A-353, CF-178, P-9, P-36).

La formación Cantabria (cnb) está formada por calizas micríticas, a veces aporcelanadas, calizas detríticas, detrítico-foraminiféricas, nodulares, margas y lentes de calizas arrecifales. En esta zona consta con los siguientes pozos (A-405, L-19, A-396, P-58, CF-202, CF-203, P-53, CF-207, A-472, A-143, A-139, CF-19, A-468, CF-225, Guayabales, A-85).

La acuosidad de las rocas no es homogénea, encontrándose en dependencia directa a la intensidad de fisuración y cavernosidad de las rocas las que disminuyen en capacidad de oeste al este. La potencia de este horizonte acuífero oscila en los límites de 30 a 40 m. Este tramo hidrogeológico corresponde la zona Yaguaramas - Aguada está clasificada como una de alta capacidad acuífera con gastos específicos de entre los 10 y 40 $l.s^{-1}$.

Rocas del Mioceno

El acuífero del mioceno está formado principalmente por la formación geológica Güines la que se caracteriza como:

La formación Güines (gn) posee una litología de calizas biodetríticas de grano fino a medio, fosilíferas, calizas biohérmicas, calizas dolomíticas, dolomitas, calizas micríticas sacaroidales y lentes ocasionales de margas calcáreas y calcarenitas. La dolomitización es secundaria. Son por lo general masivas, más raramente estratificadas. Coloración blanca, amarillenta, crema o gris. Encontrándose los siguientes pozos (A-295, A-275, P-38, CF-29, CF-184, A-269, A-217, CF-223, A-268, L-11, A-101, CF-185, CF-189, P-41, A-264, CF-176, A-215, CF-177, P-52).

Rocas del Paleógeno

Se encuentra representada en esta cuenca por las rocas del oligoceno superior las cuales se caracterizan por:

Rocas del Oligoceno superior está representada por la formación Paso Real (psr) consta con una litología de calizas y margas. Las calizas son arcillosas, biodetríticas arcillosas y más subordinadamente calizas biohérmicas, calizas dolomitizadas, dolomitas y calcarenitas. Las calizas arcillosas por desagregación originan seudoconglomerados calcáreos de matriz margoso - arenácea. En general son masivas. Las margas, al igual que las calizas son fosilíferas. Aparecen intercalaciones de areniscas y limolitas calcáreas y arcillas (principalmente esméctica) que contienen en algunos horizontes pirita, yeso, halita y lignito. En el área tipo se observa en la base un conglomerado polimíctico de matriz Margosa, fosilífera. La estratificación está enmarcada por los cambios litológicos y es frecuentemente lenticular. Colores crema, blancuzco y grisáceo en los horizontes.

Carbonáticos y grisáceo y verdoso en los terrígenos. Se encuentran asociados a los ejes de los pliegues de las fallas tectónicas. En esta zona no existe ningún pozo.

Las aguas del Oligoceno superior se encuentran al norte- este del tramo hidrogeológico Charcas –Yaguaramas. Por las condiciones de yacencia de las aguas subterráneas son de estrato-fisurales. La fisuración es más o menos homogénea encontrándose distribuida a una profundidad de aproximadamente 10-20 m. la acuosidad de la zona de fisuración es baja donde los gastos de los pozos oscilan entre 0,5 a 2,0 $l.s^{-1}$.

Rocas del Cuaternario o Pleistoceno medio

La formación geológica **Villarroja (vr)** la que se caracteriza por estar formada por arcillas arenosas y areno-limosas, arenas arcillosas y arenas cuarzosas de distintas granulometrías, pigmentadas por hidróxidos de hierro (goethita). Contiene finos lentes y capas de grava de tamaño variado, frecuentemente con buen redondeamiento y selección, constituidos por cuarzo y más subordinadamente por fragmentos de hardpan, así como concreciones ferruginosas. Las arcillas son principalmente caolinita–esméctica. La estratificación es poco discernible, localmente

lenticular. Tonalidades variables, de rojo amarillento a rojo violáceo. En esta zona se encuentra los siguientes pozos (A-96, CF-182, A-113, CF-181, A-270, A-272, A-134, CF-180, A-274, A-50, P-37, A-458, CF-191, P-33, A-64).

Esta zona ocupa casi todo el territorio del tramo hidrogeológico de Juraguá y una pequeña parte del tramo Charcas-Yaguaramas. La zona es considerada como de extremadamente alta capacidad acuífera de las rocas con un gasto específico superior a los 100 $l.s^{-1}$, se encuentra a su margen izquierda con la zona de alta capacidad acuífera de las rocas con gastos específicos de 10 a 50 $l.s^{-1}$.

Hidrografía

Las fuentes subterráneas: Aguada I y Aguada II, María Victoria, La Federal, Jorrín, Santana, Esles del Venero y Las Yeguas, se desarrollan sobre una cuenca hidrográfica que transcurre diseccionando al municipio en su parte central. Esta cuenca se encuentra represada por dos micropresas, ellas son: La Represa por el Siguanea y la Mascota por un afluente de esta última. Se producen escurrimientos que aguas abajo pueden incidir en el poblado de primera categoría y conducido por el canal Bagá interviene en el llenado de la Derivadora Hanábana (EAH, 2016).

Hacia la parte norte de esta cuenca se ubica la cuenca del Ocuje, en ella se localiza una fuente de abasto que es Jagüey Chico en su zona baja, los escurrimientos que se producen van hacia el canal Bagá una parte, realizando aportes a la Derivadora Hanábana y la otra hacia la Ciénaga Oriental de Zapata (EAH, 2016).

Más al norte y en el límite con Matanzas se ubican dos fuentes sobre el Hanábana: Los Burros y Las Cajas, por su margen izquierda, en esta cuenca se producen altos escurrimientos que se agravan con la realización de vertimientos desde el embalse Voladora ya que intervienen en la incomunicación de la autopista en la zona de la Derivadora Hanábana (EAH, 2016).

Similar ocurre en la cuenca 147 donde la fuente subterránea Real Campiña se localiza en la zona alta de la cuenca y en la parte baja las fuentes de Antonio Sánchez (Consultorio y Covadonga I), no son cauces definidos, se realiza en zonas

de muy poca pendiente, explayándose en su recorrido hacia la Ciénaga Oriental de Zapata (EAH, 2014).

La fuente Guayabales se localiza en un afluente por la margen izquierda del Ceja Borrego, cauce que aporta sus escurrimientos a la Ciénaga Oriental de Zapata (EAH, 2014).

Y la fuente subterránea La Pollera se localiza en un afluente del Yaguaramas en su parte alta, cuenca con definidos pequeños cauces y escurre por la parte sur del municipio de Aguada (EAH, 2014).

Hidrología

La disposición de la cuenca trae consigo que los ríos y arroyos que se ubican en la misma tributen a la Ciénaga Oriental de Zapata, estos cauces de este a oeste son: Alcalde Mayor, Yaguaramas, Ceja Borrego, Violeta - Siguanea y más al norte el Hanábana.

La cuenca subterránea CF1 Hanábana, la cual abarca a casi todo el municipio de Aguada de Pasajero y una parte de Abreus, tiene una capacidad explotable de 140 hm^3. Los gastos específicos en el municipio oscilan en la zona de Las Cajas entre 20-30 $l.s^{-1}$, al igual que en Real Campiña. Los valores de mayor gasto se ubican hacia la parte oeste y sur del municipio con 100 $l.s^{-1}$, el resto de las zonas del municipio se desarrollan con gastos entre 5-10 $l.s^{-1}$, excepto en la parte de Guayabales que es entre 10-15 $l.s^{-1}$ (EAH, 2017). La constitución de estos cauces al acercarse a la Ciénaga tiende a ocultarse por lo llano del relieve en esta zona.

Se utilizó el modelo matemático de las Isoyetas donde se aplica cuando se cuentan con regiones montañosas. Es importante decir que una isoyeta es una línea curva que une los puntos que tienen igual valor de las precipitaciones, en este sentido es análoga a las curvas de nivel. El procedimiento para el cálculo es el siguiente: Se asume que el valor de las precipitaciones varía en forma lineal entre uno y otro pozo, es decir sobre la línea que los une se puede trazar a intervalos regulares la curva que hace falta.

2.2. Evaluación de los resultados de la calidad de agua de la cuenca CF1 Hanábana.

Una vez obtenido los parámetros de calidad de las aguas, los cuales se encausarán del Excel formulando los distintos cálculos de los indicadores de calidad de las aguas, para luego compararlos con las normas vigentes.

Los estudios de las aguas se efectuaron en el laboratorio de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico en Cienfuegos mediante análisis químico – bacteriológicos (Standard Methods, 1998), en el caso de los análisis químicos se evaluaron los parámetros siguientes:

Tabla 2. Análisis químicos.

pH (u), ºC U=±0,5%	CE 25ºC (µS/cm) U=±0,3%	Ca^{2+} mg/L	Mg^{2+} mg/L	CO_3^{2-} mg/L	HCO_3^{1-} mg/L	Cl^{1-} mg/L U= ±2%	SO_4^{2-} mg/L U= ±30%	NO_3^{1-} mg/L	NO_2^{1-} mg/L	Na^{1+} mg/L	K^{1+} mg/L

Determinación de los nitritos por el método del ácido clorhídrico.

Primeramente, si la muestra esta turbia se filtra y de ella se seleccionan 50 ml y se le adicionan 1 ml de 1 N (concentración), se agita y se leen a 220 y 275 de longitud de onda, los resultados provienen a partir de una cuenta en una tabla de concentración.

Determinación de los nitratos por el método del ácido sulfamilamida.

De igual manera si la muestra esta turbia se filtra y de ella se elige 40 ml y se le adiciona 2 ml de sulfamilamida, 2 ml de naftilen de amino de dihidrocloruro y se mezclan, luego se lleva hasta los 50 ml y se lee a 543 de longitud de onda, seguidamente por mediación de una tabla formulada se ubican los valores y nos muestra la concentración.

De estos se tomaron sólo los valores de los nitratos y los nitritos, y se compararon con las normas de calidad de agua para el consumo humano según las normas cubanas NC 1021: 2014 "Higiene Comunal- fuentes de abastecimiento de agua- calidad y protección sanitaria" y la NC 827:2012 "Agua potable-requisitos sanitarios"

Se utilizó para la mapificación de los resultados obtenidos en el Excel por el software ArcGIS, utilizando el modelo matemático natural neighbors (vecino natural) aplicando ponderaciones, basándose en áreas proporcionales para interpolar un valor que podrá emplearse para exponer situaciones con mayor claridad, para indicar como se pueden reajustar. Su propiedad básica es que es local, la cual utiliza solo un subconjunto de muestras que circulan a un punto de consulta y asegura que las muestras interpoladas estarán dentro del rango de valores.

2.3. Interpretación de los resultados obtenidos de muestras recogidas en el campo.

Después de haber procesado los resultados mediante la formulación de la base de datos en Excel fue necesario la comparación de estos mediante las normas cubanas vigentes.

Tabla 3.**NC 1021: 2014**

Nitratos	mg/L	45
Nitrito	mg/L	0,01
Plomo	mg/L	0,05
Selenio	mg/L	0,01

Tabla 4. **Otras sustancias Según NC-827:2012**

Calcio	mg/L	200
Hierro	mg/L	0,3
Manganeso	mg/L	0,1
Cobre	mg/L	2,0
Magnesio	mg/L	150
Sulfato	mg/L	400
Zinc	mg/L	5,0

Conclusiones Parciales

Se caracterizaron los pozos de abasto utilizando el suelo, la geología, hidrología y la hidrografía según los datos obtenidos en la Empresa de Aprovechamiento de Recursos Hidráulico en Cienfuegos.

Se evaluaron los parámetros de calidad de las aguas, los cuales se encausarán del Excel formulando los distintos cálculos de los indicadores de calidad de las aguas. A través del estudio que se realizó en el laboratorio de Recursos Hidráulico mediante análisis físico-químico.

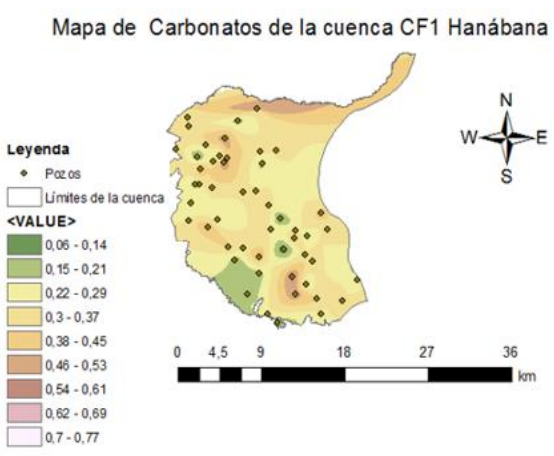
Capítulo 3: Resultados y discusión

Los mapas temáticos que se representan sirven como punto de referencia para conocer con claridad cada uno de los resultados que se revelen en el laboratorio. Estos tipos de mapas se emplean para desarrollar, evaluar, ajustar y presentar diseños y planes, especialmente cuando se deben valorar soluciones.

Se pretende conocer el uso de los mapas temáticos como herramienta para reorganizar y completar en base a la discusión la representación de una realidad y las relaciones que se derivan de esta.

En los procesos de gestión del agua no se debe de olvidar la necesidad de la conservación y protección de la calidad de las mismas mediante un sistemático monitoreo y evaluación por lo que estos mapas reflejan en qué medida se comportan los diferentes elementos al poder ser comparados con las normas.

Con el desarrollo demográfico de la población y unido al desarrollo agroindustrial las fuentes de abasto de agua sufren modificaciones en la composición química producto a los diferentes usos, por los escurrimientos y percolación en los períodos lluviosos al fluir las aguas por zonas con fertilizantes, pesticidas entre otras incidencias. También el vertimiento de las aguas residuales tiene su papel preponderante al ser vertidas en distintos causes sin el tratamiento eficiente. Los resultados de las muestras llevadas al laboratorio arrojaron que existían diferencias en diferentes pozos según la ubicación de estos, en las figuras que se muestran a continuación.



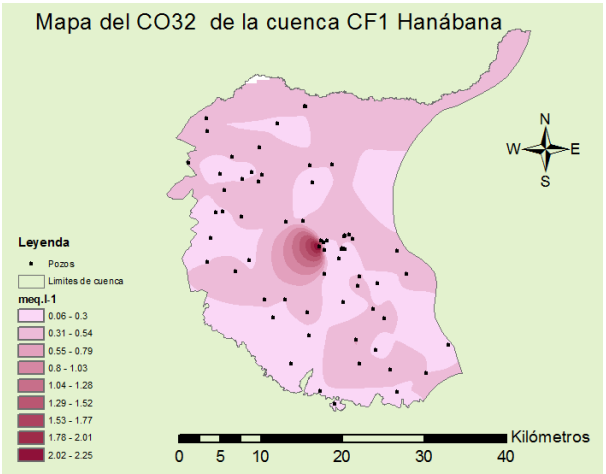


Figura 3. Comportamiento de los carbonatos en el período 2015 y 2017 en la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana.

Los resultados de los carbonatos en los ensayos obtenidos del laboratorio arrojaron que hubo un aumento significativo en uno de los pozos observados de 1.53 a 2,25 meq. l^{-1} indicando un aumento del pH en esta zona. Coincidiendo con los estudios realizados por la (EHA 2015).

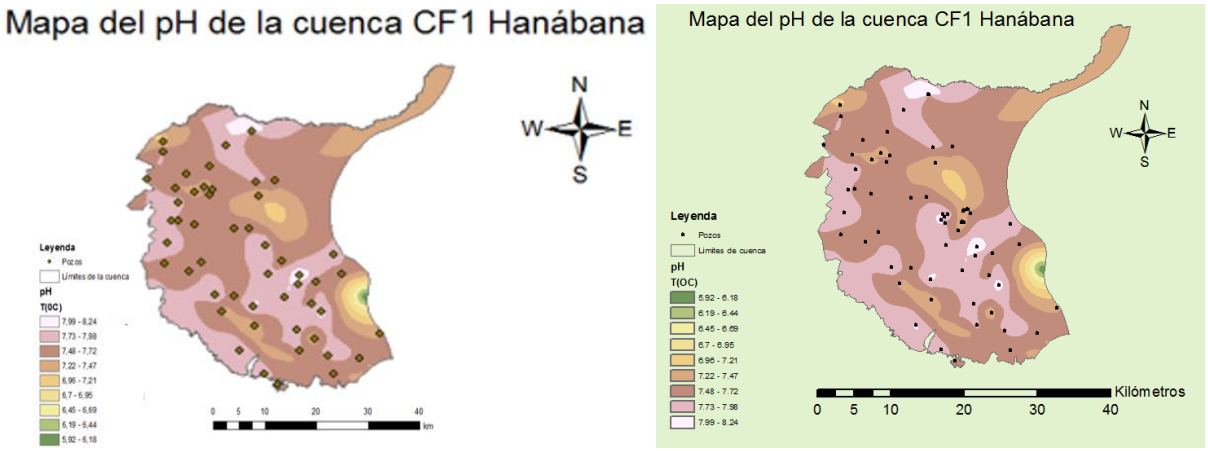


Figura 4. Comportamiento del pH en el período del 2015 al 2017 de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana.

Una vez representado los mapas del pH se determinó que los datos arrojados por el ion carbonato, coinciden con el aumento del pH con respecto al año 2015 que fue de 7,73 a 8,24 lo cual existe alcalinización, en algunas zonas determinadas según la Norma Cubana 1021:2014, lo que puede incidir en las plantas de forma negativa provocando en ella la inhibición de la absorción de los nutrientes del suelo, baja capacidad de infiltración, lenta permeabilidad, estructura pobre. Coincidiendo con los estudios realizados por el autor Lozano (2000).

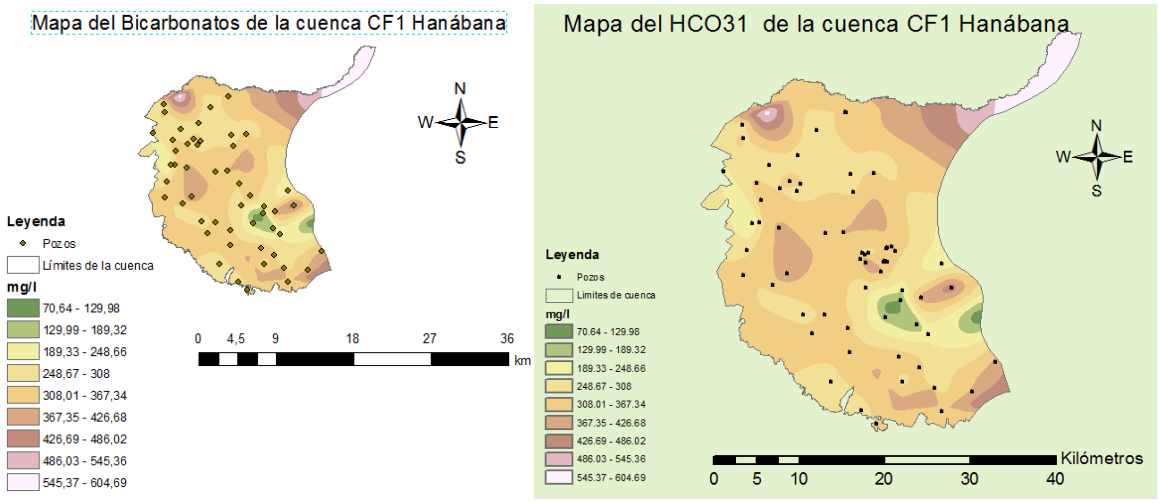


Figura 5. Mapas del ión bicarbonato (HCO31) expresado en mg.l^{-1}, en el periodo del 2015 al 2017de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana.

Se revelaron los valores de los iones bicarbonatos los cuales corroboran las notas anteriores especificando la existencia de mayores valores de estos sobre los carbonatos, clasificándose las aguas en su general como aguas bicarbonatadas cálcicas. Concordando con los estudios realizados a las aguas subterráneas por Bellido (2009).

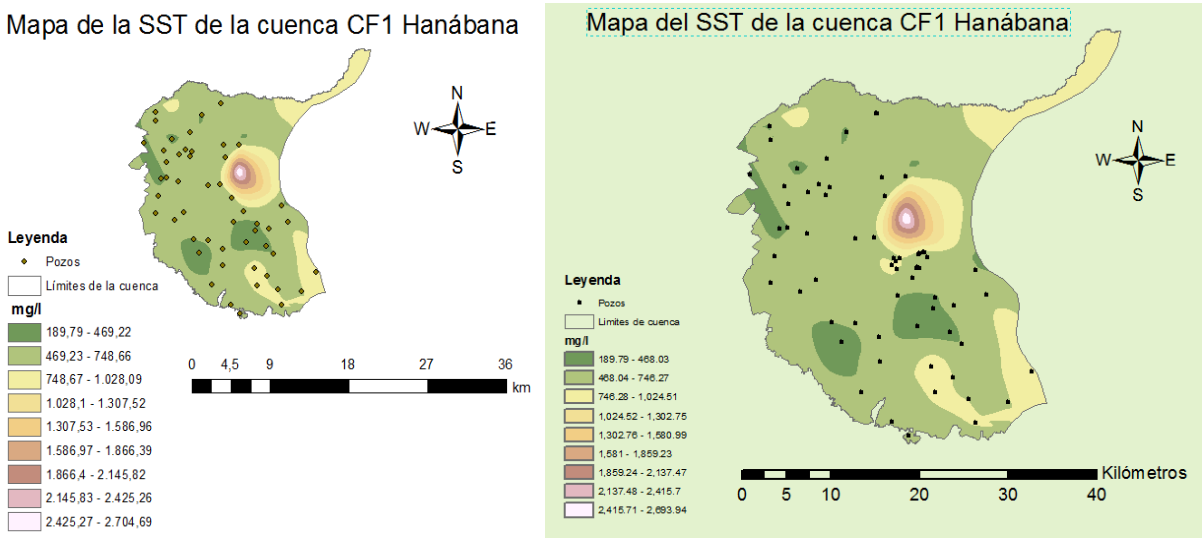


Figura 6. Mapa de contenido de sales en el agua (SST) expresado en mg. l^{-1}, en el período del 2015 al 2017 de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana.

Se puede observar sólo un área evaluada de muy alto riesgo, correspondiendo a un pozo de un productor que por negligencia realizó un exceso de bombeo lo que trajo como consecuencia la salinización en esta zona, arrojando un valor por encima de la Norma Cubana 827:2012 con respecto a la cantidad de sales existente en el agua. Coincidiendo con los estudios realizados por Brito Ana (2015).

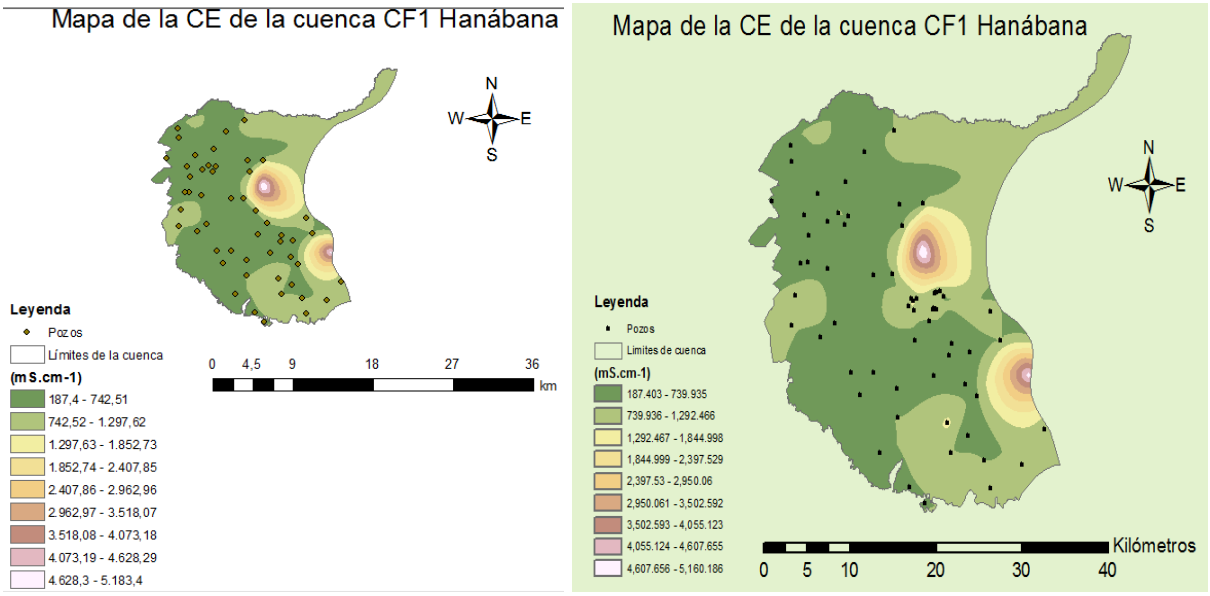


Figura 7. Mapa de conductividad eléctrica (CE) a 25ºC expresado µS.cm^{-1} a U=±0,3%, en el periodo del 2015 al 2017 de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana.

La figura 7, anteriormente ilustrada precisó con puntualidad los pozos que presentaron afectaciones de salinización intrusión vertical producto a la combinación de una excesiva explotación a la hora de bombear agua para el cultivo del arroz en un período seco crítico. La cual nos da una medida de la afectación del agua que influye en la disponibilidad de esta para el riego de los cultivos. Lo que representa un agua moderadamente salina, con limitaciones para el crecimiento de muchos cultivos y la consecuente pérdida de rendimiento. Coincidiendo con los estudios realizados Brito Ana (2015).

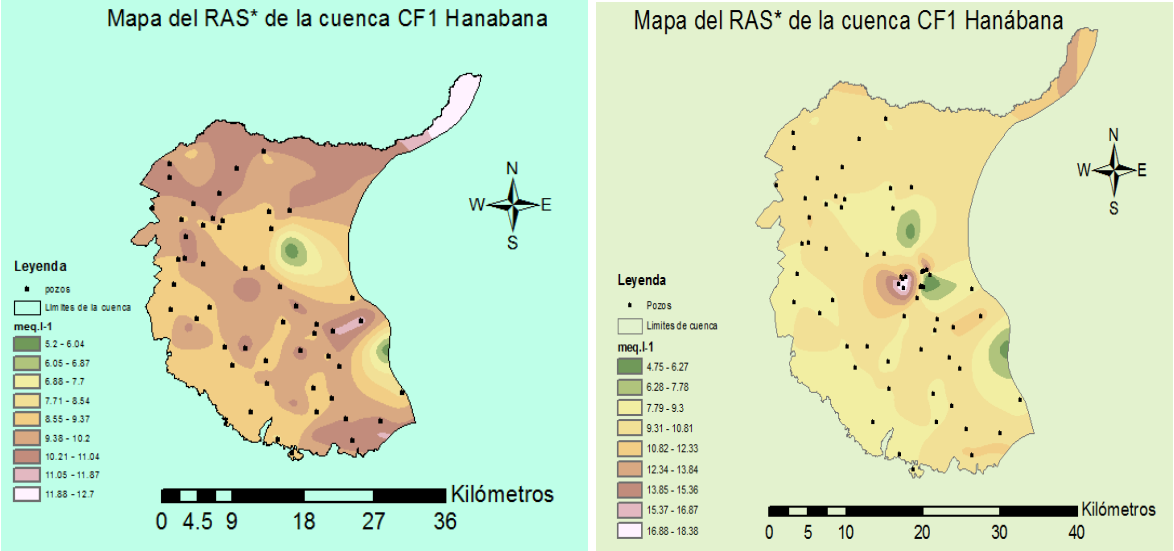


Figura 8. Mapa de Relación de Absorción de Sodio (RAS), en el periodo del 2015 al 2017 en la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana.

Para exponer en que magnitud que incide en los problemas de permeabilidad de los suelos el ión sodio, se calcula la relación de absorción de sodio (RAS) como parámetro de especial importancia y se determinaron los valores de la relación de adsorción de sodio en sus diferentes conceptualizaciones, relación de adsorción de sodio ajustado (RAS aj) y relación de adsorción de sodio corregido (RAS°), ya que este índice incide directamente en las propiedades físico-químicas de los suelos y, por consiguiente, sobre los plantas, la cual se muestra en la figura 8.

El primer mapa anterior indica que los mayores valores se encuentran entre 8,54 meq.l^{-1} y 11,04 meq.l^{-1} clasificándose como aguas de baja peligrosidad sódica pero después de unos años, los niveles se elevaron a 10.82 meq.l^{-1} y 18,38 meq.l^{-1} clasificándose como mediana peligrosidad sódica, por lo que estas aguas pueden usarse en suelos con textura gruesas o con buena permeabilidad. En suelos con textura fina o con drenaje deficiente, puede elevarse el sodio de intercambio, este efecto se ve atenuado en suelos con yeso. Lo que podría llevar a la degradación de este suelo con la siguiente perdida de estructura y permeabilidad. Coincidiendo con los estudios realizados en la Universidad Autónoma Chapingo (2009).

.

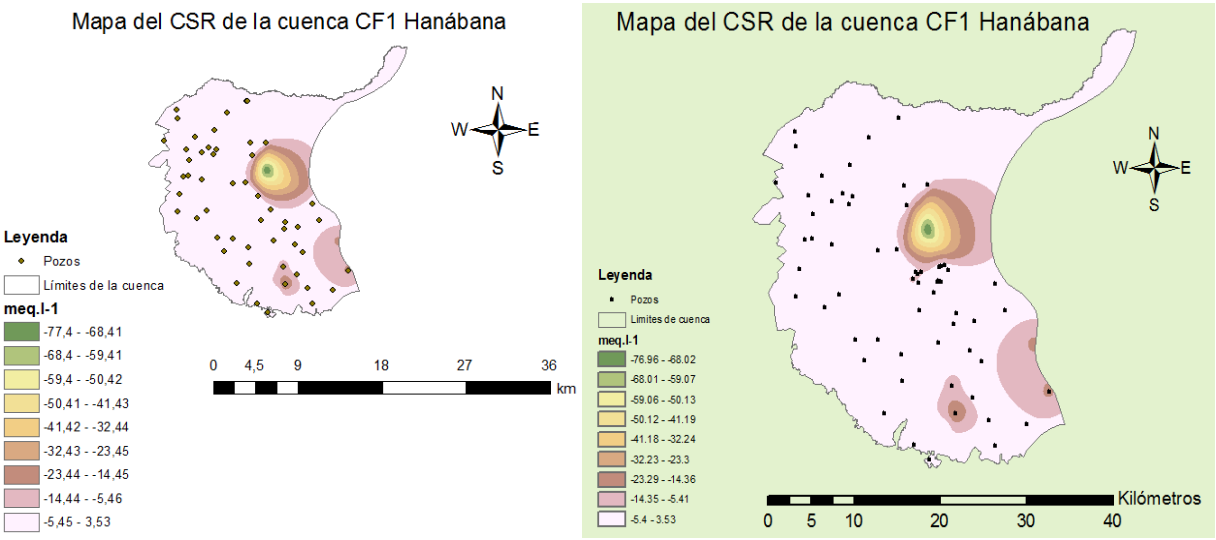


Figura 9. Mapa del comportamiento del carbonato sódico residual (CSR) en el periodo del 2015 al 2017 de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana.

El carbonato sódico residual (CSR) representado en la figura 9 expuesta a anteriormente nos predice la tendencia del calcio y el magnesio a precipitarse en el suelo cuando se riega con aguas altamente carbonatadas por lo que se observa el predominio de bajos riesgos de precipitaciones de estos elementos al encontrarse generalmente entre los valores menores que 1,25 meq.l^{-1} clasificando como aguas recomendables. De la cual existen tres zonas con gran influencia de magnesio y calcio con respecto a las demás arrojando valores de -14,36 hasta -76,29 meq.l^{-1} pero no sobrepasan los 1,25 meq.l^{-1} los cuales se consideran aguas de buena aptitud para el riego, según los autores Cortes-Jiménez, Juan Manuel; Troyo-Dieguez, Enrique (2009).

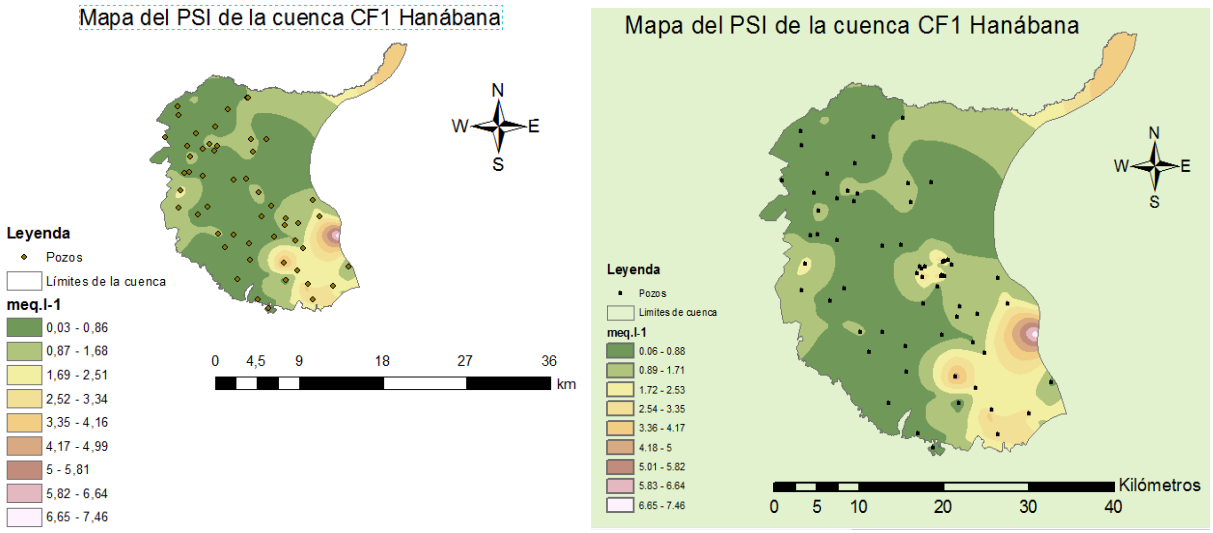


Figura 10. Mapa del porcentaje de sodio intercambiable (PSI), en el periodo del 2015 al 2017 de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana.

El porcentaje de sodio intercambiable (PSI) reflejado en la figura 10 nos indica que sólo hay afectación en unas pequeñas zonas representadas por dos pozos, de los cuales uno de ellos llega a obtener hasta un valor de 5,01 meq.l^{-1} hasta 7,46 meq.l^{-1} obteniendo una clasificación de ligeramente sódica, de la cual sirve para el riego, dando como resultado que en un futuro pueda existir problemas de infiltración, el resto de la zona no presenta riesgos. Coincidiendo con las Normas cubanas 1021:2014 y la 827:2012 y los estudios realizado por la (EAH 2015)

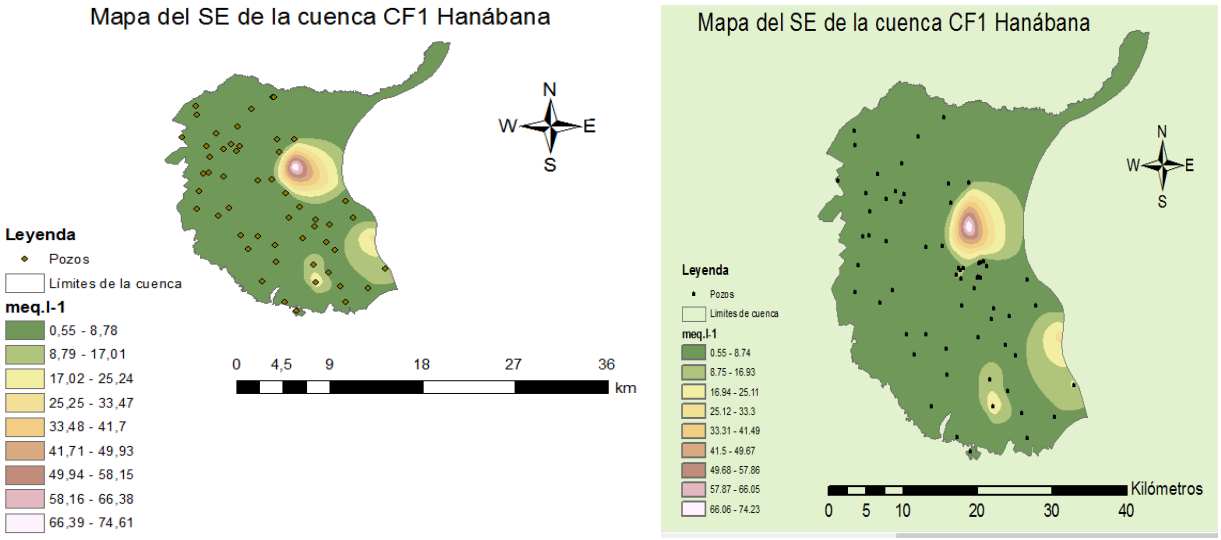


Figura 11. Mapa de la salinidad efectiva (SE), representado en el periodo 2015 al 2017 de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana.

La figura 11 ilustrada anteriormente representa la distribución espacial de la salinidad efectiva la cual indica que en sólo una zona representada por un pozo presenta valores no permisibles por lo que se considera buena el agua en el resto de las zonas. Coincidiendo con los estudios realizados por Boza (2016).

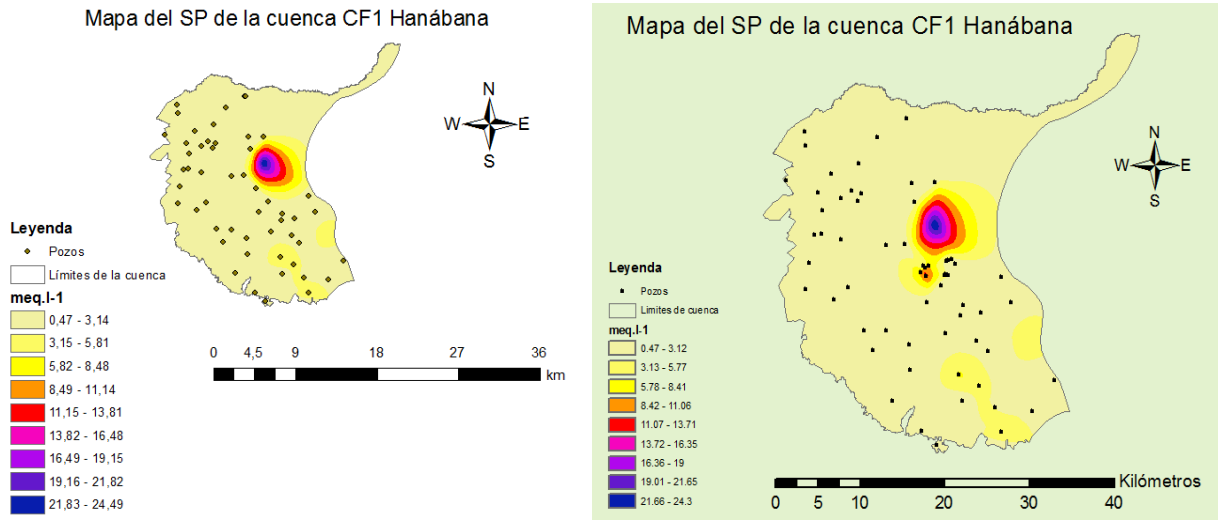


Figura 12. Mapa de la salinidad potencial (SP), representada en el período del 2015 al 2017 de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana.

La figura 12 se representan los valores de la salinidad potencial que indican valores por debajo de los límites de tolerancia, según las Normas Cubanas vigentes 1021:2014, 827:2012, corroborando la información anterior que corresponde a una clasificación de agua buena para el riego de los cultivos excepto en la zona de alta salinización como se muestran en la figura, arrojando valores de 8,42 hasta 24,3 meq. l^{-1}. Concordando con la descripción realizadas por los especialistas Brito (2015) y Boza (2016).

Conclusiones

Se elaboraron los mapas temáticos de la calidad de las aguas subterráneas de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana.

Se caracterizaron los pozos de abasto de agua a través del clima, el suelo, la geología, hidrología y la hidrografía.

Los análisis mostraron que el ión carbonato presentaba predominio de valores de 0.06 a 0.55 $mg.l^{-1}$.

El pH de las muestras manifestó valores por encima de la neutralidad, siendo los de mayor representatividad los de 7,73 a 8,24.

Los valores de los iones de los bicarbonatos indicaron que las generalidades de las aguas son bicarbonatadas cálcicas cuyos valores se encuentran entre los 426,69 a 545,37 mg.l.

Las sales solubles totales obtenidas por cálculos expresaron que no existen riesgo en la provincia revelando valores de 469,23 y 2415.61 mg. l como los preponderantes.

La conductividad eléctrica se comportó sin problemas con valores de 187,4 a 1292,45 $\mu S.cm^{-1}$.

Los valores predominantes de la relación de absorción de sodios corregidos (RAS^{o}) fueron 10.82 $meq.l^{-1}$ a 18,38 $meq.l^{-1}$ clasificándose como mediana peligrosidad sódica.

El carbonato sódico residual no presentó riesgo de precipitación del calcio y el magnesio exhibiendo valores inferiores a 1,25 meq. l^{-1}.

El cálculo del porcentaje de sodio intercambiable (PSI) reveló el predominio de valores de 0,06 a 1,72 meq. l^{-1}, clasificándose como agua sin riesgo en la provincia.

La salinidad efectiva hallada corroboró que el agua no presentaba riesgo en su uso con valores que oscilan sobre 0,55 a 8.75 meq. l^{-1}.

La salinidad potencial obtenida ofreció valores por debajo de los índices de riesgo para el riego de los cultivos, clasificándose como agua buena con valores entre 0,47 y 3.12 meq.l^{-1}.

Recomendaciones

1. Continuar con la actualización de los mapas temáticos obtenidos en un periodo seco semestral.

2. Concluir con los mapas temáticos restantes vinculados a la cuenca como son: la Dureza, Presión Osmótica, Índice de Scott, Índice de Saturación de Languciar y el Porcentaje de Sodio Posible.

3. Divulgar los resultados para el conocimiento de otros organismos que utilizan estas aguas.

Bibliografía:

1. Agua, C. N. d., 2011. *Comision Nacional del Agua Gobierno Mexico.* [En línea]
   Available at:
   http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documento/SINA/Capitulo_8.pdf
2. Andrés Sahuquillo, E. C. L., 2015. *La gestión de las aguas subterraneas,* España: s.n.
3. Anon., 2013. *Contaminacion fisica y quimica del agua.* [En línea]
   Available at: https://www.slideshare.net/CH3CO9821/contaminacion-fisica-y-quimica-del-agua
   [Último acceso: 2017 marzo 29].
4. Anon., 2014. *Sistema de informacion geografica.* [En línea]
   Available at:
   http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/internet/sistemainformaciongeografica.pdf
   [Último acceso: 29 marzo 2017].
5. Anon., 2017. *EcurRd.* [En línea]
   Available at: https://www.ecured.cu/R%C3%ADo_Han%C3%A1bana
   [Último acceso: 10 marzo 2017].
6. Anon., 2017. *Wikipedia.* [En línea]
   Available at: https://es.wikipedia.org/wiki/Hidrogeolog%C3%ADa
   [Último acceso: 29 marzo 2017].
7. Bellido, C. R. C., 2009. *Aguas Subterráneas del acuifero Asia-Omas,* Perú,Cañete: s.n.
8. Bellino, I. O., 2012. *Agua Subterraneas.Conocimiento y Explotación.* Buenos Aires: s.n.
9. CITMA, 2013. *Los Caminos del agua en Cuba,* Cuba: s.n.
10. Cortes Jiménez,Juan Manuel;Troyo-Dieguez,Enrique, 2009. *Revista científica Redalyc de la UInversidad Autónoma Chapingo en México,* pp. 133-141.
11. CUTRO, E. M., 2015. *Instituto Nacional de Recursos Agropecuarios.* [En línea]
    Available at: http://www.gob.ar/noticias/la-impotancias-de-la-utilización-de-los-mapas-de-suelos-primera-parte
    [Último acceso: 9 marzo 2017].
12. GEARH, 2017. *Análisis cuantitativo de la cuenca CF1 Hanábana,* Cienfuegos: s.n.
13. Giraldo, J. A. P., 2012. *La Nacion.com.co.* [En línea]
    Available at: http://www.lanacion.com.co/index.php/noticias/noticias-salud/item/126544-alteraciones-quimicas-en-el-agua
    [Último acceso: 2017 marzo 29].
14. HerraízL, A. S., 2009. La importancia de las aguas subterráneas. *Real Academia de Ciencias Exactas ,Físicas y Naturales,* 103(1), pp. 97-114.
15. INRH, 2013. Los caminos del agua en Cuba. 5 septiembre.

16. INRH, 2015. *Recursos Hidricos e Hidraulicos.* [En línea]
Available at:
http://www.hidro.cu/index.php?option=com_content&view=article&id=64&Itemid=41
17. Juan Antonio López-Geta, J. M. F. A. R. G. V. G., 2009. *Las aguas subterráneas.* España: Instituto Geológico y Minero de España.
18. Laboratorio Unidad Pacífico Sur (CIESAS), 2010. *Sistema de informacion geografica.* [En línea]
Available at: https://langleruben.wordpress.com/%C2%BFque-es-un-sig/
[Último acceso: 28 marzo 2017].
19. LinkedIn Corporation , 2013. *SlideShare.* [En línea]
Available at: https://www.slideshare.net/muerteanun/cloruros
[Último acceso: 25 marzo 2017].
20. Lozano, A. S., 2000. *Quimica teorica y práctica.* s.l.:San Marcos.
21. María Paula Collazo Caraballo, J. M. X., 2012. *Manual de Agua Subterránea.* Primera edición ed. Montevideo, Uruguay : s.n.
22. Marín, C. M., 2014. *La energía del cambio.* [En línea]
Available at: http://www.laenergiadelcambio.com/como-esta distribuida-el-agua-del-planeta
23. Muehrcke, P., 2002. *Map Use.* 4 ed. Chicago: The University of Chicago Press.
24. Mundo, C. B., 2015. *BBC.* [En línea]
Available at:
http://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/11/151117_agua_subterranea_mapa
25. Olaya, V., 2012. *Sistema de Informacion Geografica.* [En línea]
Available at: http://volaya.github.io/libro-sig/index.html
[Último acceso: 29 marzo 2017].
26. Palacio, I. S. R., 2010. Evaluación de la salinidad potencialde aguas para riego. *Ciencias Holguín,* Revista trimestral(16), pp. 1-2.
27. Paramio, J. M., 1995. *Monografias.com.* [En línea]
Available at: http://www.monografias.com/trabajos14/propiedades-agua/propiedades-agua.shtml#pr
[Último acceso: 29 marzo 2017].
28. Pim, L. E., 1998. *Contaminacion de las aguas subterraneas.* [En línea]
Available at:
http://www4.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/11CAgu/170AgSub.htm#POBLACION
[Último acceso: 31 marzo 2017].
29. Porras Martín, J. y otros, 1985. *CALIDAD Y CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ESPAÑA.* [En línea]
Available at: http://aguas.igme.es/igme/publica/libro43/pdf/lib43/3_1.pdf
[Último acceso: 29 marzo 2017].
30. Ramón, I. B., 2017-2018. *Análisis cualitativo de la cuenca CF1 Hanábana,* Cuba: s.n.
31. Redonda, M., 2013. Los Caminos del agua en Cuba. 5 septiembre.
32. Suárez, I. E. E., 2017. *Analisis cualitativo de la cuenca CF1 Hanábana,* Cienfuegos: s.n.
33. Tiempo, E., 1998. *El Tiempo.* [En línea]
Available at: http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-837398
[Último acceso: 30 marzo 2017].

34. Valdés, A. O. H., 2011. Recursos hidraulicos subterráneos:observaciones sobre su evaluación y gestión en Cuba. *Ingeniería Hidraulica y Ambiental,* pp. 3-12.
35. Valencia, J., 2014. *IMPORTANCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.* [En línea] Available at: http://apusdelagua.blogspot.com/2014/11/importancia-de-las-aguas-subterraneas.html [Último acceso: 11 marzo 2017].
36. Beven, P. 2000. Who is goody? Demythologizing the PRA Agenda. Journal of International Development, 12: 751-759.
37. Acton, C. 2000. Community Indicators for Sustainability: A European overview. Environmental Thrust, Leicester.
38. Bell, S. 2000. Logical frameworks, Aristotle and soft systems: A note on the origins, values and uses of logical frameworks. Public Administration and development, 20(1): 29-31.
39. PNUMA. (2008). Gráficos de Agua Vital: Un Resumen del Estado de los Recursos de Agua Dulce y Marina del Mundo, 2da Edición, PNUMA, Nairob.
40. The Millennium Ecosystem Assessment, 2005, (a synthesis by over 1000 leading biological scientists). http://www.maweb.org/en/index.aspx.
41. María Paula Caraballo y Jorge Montaño Xavier.(2012). Manual de Agua Subterránea. P-34. ISBN: 978-9974-594-09-8. Montevideo, Uruguay.
42. Del Puerto RA, Sardiñas PO, Romero PM. Nitritos y nitratos: afectación a la salud. La Habana. (En Línea). (Fecha de acceso 21 de enero 2008). Disponible en: http//www.inhem.sld.cu.
43. Halwani J, Baroudi BO, Wartel M. Nitrate contamination of the ground water of the AKKAR Plain in northern Lebanon. Sante 1999; 9(4): 219-23.
44. Adolfo Sourdeaux. 2002. El problema sanitario del nitrato en el agua de consumo humano. Boletín del Centro de Ingenieros del Noroeste.: Disponible en: URL.http://www.basered.com.ar/Art3.htm.
45. Casey R.E. y Klaine S.J.(2001). Nutient attenuation by a riparian wetland during artificial runoff events. 30(5): 1720-31.
46. Hudak P.F. y Wachal D.J. (2001). Oil Production, agriculture and groundwater quality in the southeastern Gulf Coast Aquifer Texas. 72(3): 249-64.
47. Vitoria M.I y Brines S.J.(1991). Nitrates in dirinking water in the Valencia community. Indirect risk of metahemoglobinemia in infants. 34(1): 43-50.
48. Gupta S.K., Gupta R.C. y Seth A.K.(2000). Metahemoglobinemia in areas with high nitrate concentration in dirinking water. Natl Med J India; 13(2): 58-61.
49. Cessna A.J., Elliott J.A., Tollefson L. y Nicholaichuk W.(2001). Herbicide and nutrient transport from agriculture an irrigation district into the South Saskatchewan River. 30 (5): 1796-807.
50. McQuarrie K.J., Sudicky E.A. y Robertson W.D.(2001). Numerical Simulation of a fine-grained denitrification layer for removing septic system nitrate from shallow groundwater. 52 (1-4): 29-55.
51. Drolc A, Kondan JZ, Cotman M. Evaluation of total nitrogen pollution reduction strategies in a river basin: a case study. Water Sci Tecnol 2001; 44 (6): 55-62.
52. Gatseva PD, Mardirosian TH, Popova EJ, Iskranova ES, Vladeva SV, Pavlova KI. Evaluation of health hazards in children from region with nitrate pollution. Folia med (Plovdiv) 2000; 42(1): 19-22.

53. Nebbache S, Feeny V, Poudevigne I, Alard D. Turbidity and nitrate transfer in karstic aqurifer in rural areas: the Brione Basin case study. J Environ Manage 2001; 62(4): 389- 98.
54. Tulupou VP, Pridhod EI, Fomichenko EI. Toxicogical and hygienic assesment of nitrates in food products. 2001;70(2): 32-40.
55. Margarita Fontova de los Reyes, Nercy Becerra Infante, Eulalia López Álvarez, Argelio Fernández Richelme, Enrique Martínez Ovide, Abel Fernández Díaz, Rubén Hernández Boy, María Isabel González González, Leyda Oquendo Barrios, Carmen Terry Berro, Rigoberto Lamyser Castellanos. (2012). Recursos hídricos en Cuba: una visión.p-250. ISBN: 978-607-9217-04-4.
56. Cañas P.R., Sardiñas P.O. y García M.M. Evaluación del riesgo de metahemoglobinemia en lactantes por exposición a nitratos a través del agua de consumo. En: INHEM. Agua y salud. Serie Ambiental No. 3. Cuba. La Habana: Editorial Ciencias Médicas; 1992.p. 97-106.
57. Naranjo, C., González, D., Garcés, G., Brandimarte, A., Muñoz, S. y Musle, Y. (2005). Una metodología rápida y de fácil aplicación p ara la evaluación de la calida d del agua, utilizando el índice BMWP -Cub para ríos cubanos. Tecnura, 17, 65 – 76.
58. ENAST. 2014. Informe Final de Resultados de Ensayo. NC ISO: 2008.
59. Cuba, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente: La Estrategia Ambiental Nacional 2007-2010. La Habana: Editorial Academia, 93 p., 2007.
60. MINAG, Dirección de Ingeniería Agrícola. 2014. Programa de desarrollo hidráulico nacional. Ministerio de la Agricultura.

ANEXOS