

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Departamento de Ingeniería Hidráulica

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Determinación de la Disponibilidad de Agua Subterránea en la Cuenca Hidrogeológica CF1 Hanábana.

Autor: Yasiel Socorro Rodríguez

Tutor: Ing. Manuel Boza Ramón

Santa Clara , junio 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a la persona que me trajo al mundo con mucho amor y cariño, la que ha sabido guiarme desde que comencé con el andar de mis primeros pasos en la vida. A ella le estaré de por vida agradecido por ser madre, padre, compañera y amiga durante estos 24 años enfrentando todos los duros y amargos momentos que impone la vida; por eso a Maribel Rodríguez Padrón " GRACIAS MAMÁ ".

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor Ing. Manuel Boza Ramón por haber dado ese paso al frente y brindarme su conocimiento en todo momento. Gracias

A mi oponente MSc. Rafael Matamoros García por haberme apoyado en esta etapa final en todas las inquietudes que se presentaron en este trabajo de diploma, abriendo las puertas de su casa para acogerme como un hijo más.

A todos los profesores que en los cinco años compartieron conmigo un momento de su vida durante el transcurso de mi carrera. Gracias

A mi familia que desde el primer momento siempre estuvieron a mi lado, no solo a lo largo de la carrera sino desde que empecé mi vida como estudiante.

A mi tía Marilis Rodríguez Padrón que es mi segunda madre en este mundo y la tengo como un guía en mi vida, ya que me ha enseñado que nunca me rinda y siempre seguir para adelante dando amor a las personas que me rodean.

A Carlos Rafael Valiente Rodríguez y Laura de la Caridad Valiente Rodríguez que son como mis hermanos y han sabido darme su mano para levantarme en los momentos más difícil de mi vida.

A mi tío Ángel Valiente Ferreiro por todas las carreras que dio conmigo y por tenerme como un hijo más.

A una personita que conocí en el transcurso de mi vida universitaria, mi novia Liesni Ferrer Portuondo, por apoyarme en todo momento en este camino duro pero no imposible de superar.

A la persona más importante en mi vida por permitir que este sueño se hiciera realidad, por forjarme y educarme para ser una mejor persona, por luchar conmigo en estos cinco años, por estar a mi lado y compartir los buenos y malos momentos que nunca olvidaré. Gracias MAMI.

A Aduar Ricardo Estévez que más que un amigo es para mí un hermano, por estar presente en estos años de mi vida para darme su mano siempre para lo que hiciera falta.

A todos mis compañeros de aula por compartir estos cinco años de carrera, a mis compañeros de cuarto Maikel, Mario C y Meylin por haberme aguantado en todos los momentos que pasamos juntos y a todos aquellos compartieron conmigo un instante de su vida.

A cada persona que de una forma u otra ha influido en mi formación como profesional en el transcurso de estos duros cinco años.

RESUMEN

El estudio llevado a cabo correspondió a una investigación del tipo no experimental descriptiva donde se planteó como principal objetivo de obtener la disponibilidad de agua subterránea existente para facilitar a la Empresa Provincial de Aprovechamiento Hidráulico de Cienfuegos el manejo en el balance del recurso hídrico, a partir de definir sectores o zonas en la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana. Para ello se identificaron los pozos de estudio que abarcaban estas áreas donde mediante los monitoreos o trabajos de campo en conjunto con especialistas y técnicos de la empresa se obtuvieron valores que luego servirían para la actualización de las bases de datos existentes. Los mismos se procesaron con la ayuda de los programas computacionales MapInfo 10.5, Arcgis 10.1 y Surfer 11.2 y se realizaron los hidrogramas de los pozos calculándose por medio de un gráfico de control de balance la recarga neta del acuífero (Δh), para luego formular el método de obtención utilizando la fórmula simplificada de Bánderman utilizadas para flujos lineales en acuíferos libres o no confinadas. Como resultados se obtuvieron los volúmenes de agua por zonas y la suma de estos brindó aproximadamente el volumen real de la cuenca.

Palabras claves: **Disponibilidad, agua subterránea, sectores, cuenca hidrogeológica, volumen.**

ABSTRACT

The study carried out corresponded to an investigation of the non-experimental descriptive type where it was proposed as the main objective to obtain the availability of existing groundwater to ease the management in the balance of the water resource at the Provincial Hydraulic disposition Company of Cienfuegos, defining sectors or zones in the CF1 Hanábana hydrogeological basin. To this end, the study of wells that covered these areas were identified, where, through monitoring or field work together with specialists and technicians of the company, values were obtained that would then be used to update the existing databases. These were processed with the help of the computer programs MapInfo 10.5, Arcgis 10.1 and Surfer 11.2 and the hydrographs of the wells were established by calculating the net recharge of the aquifer (Δh) by means of a balance control graph, to then formulate the obtaining method using the simplified Bínderman formula used for linear flows in free or unconfined aquifers. As a result, water volumes were obtained by zones and the sum of these provided approximately the actual volume of the basin.

Key Works: availability, groundwater, sectors, hydrogeological basin, volumen.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
INTRODUCCIÓN	1
Capítulo1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTUDIO DE ANTECEDENTES.	7
1.1 Generalidades sobre los Acuíferos y las Aguas Subterráneas.....	7
1.1.1 Características geológicas de un Acuífero	7
1.2 Características de los parámetros hidráulicos.	12
1.3 Evaluación de los Recursos Subterráneos.	15
1.3.1 Balance de agua.	17
1.3.2 Cálculo del volumen disponible.	21
1.3 Distribución y usos del agua en Cuba.....	22
1.4 El agua en la provincia de Cienfuegos.....	25
1.4.1 Pronóstico del comportamiento de los niveles de la cuenca.	27
1.4.2 Utilización de las Aguas Subterráneas en la Cuenca CF1 Hanábana.....	28
1.5 Importancia del dato básico Hidrogeológico.	28
1.5.1 Niveles:	29
1.5.2 Redes de Monitoreo.	29
1.6 Generalidades de los Sistemas de Información Geográfica.	30
1.6.1 Empleo de los Sistemas de Información Geográfica.....	32
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	34
2.1 Sectorización hidrogeológica.	34
2.2 Identificación de los pozos muestreados en la cuenca.	35

2.2.1 Consideraciones para la selección y establecimiento para la selección de pozos a sondear.....	35
2.2.2 Selección de los pozos de observación.	36
2.3 Características físico-geográficas la Cuenca CF1 Hanábana.....	37
2.3.1 Características geológicas.	37
2.3.2 Características topográficas.....	40
2.3.3 Características hidrográficas.	40
2.3.4 Características climatológicas.....	42
2.4 Comportamiento Hidráulico.	47
2.5 Cálculo del volumen disponible.	53
2.5.1 Cálculos de los parámetros hidráulicos.....	53
2.5.2 Balance de Agua Subterránea	58
2.5.3 Cálculo del volumen disponible en la cuenca.....	61
Conclusión parcial:	63
CAPÍTULO 3. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	64
3.1 Ubicación geográfica de la cuenca CF1 Hanábana.....	64
3.2 Sectorización hidrogeológica.	64
3.2 Identificación de los pozos muestreados en la cuenca.....	67
3.3 Evaluación del comportamiento hidráulico.....	69
3.4 Evaluación de los volúmenes aproximados de los recursos naturales.	72
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	74
Bibliografía:.....	79
ANEXOS	82

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de agua dulce es uno de los grandes problemas que se plantean en la actualidad, la determinación del recurso hídrico disponible y aprovechable en las diferentes zonas de una cuenca hidrogeológica es de gran interés para los distintos usuarios que dependan del volumen existente en la misma, de modo que se asegure su aprovechamiento y uso racional de las distintas fuentes a partir del comportamiento temporal y espacial de las variables: lluvia, nivel estático, explotación y escurrimiento subterráneo y su parametrización que permitan conocer las condiciones de alimentación y descarga del acuífero.

La tarea de proporcionar cantidades suficientes de agua para las necesidades sociales, económicas y medioambientales ha sido considerada tradicionalmente responsabilidad de las personas directamente involucradas en su extracción, recolección y uso: el denominado sector del agua. Sin embargo, la disponibilidad de agua durante todo el ciclo hidrológico se ve influida por muchos factores que escapan al control directo de las autoridades del sector del agua. Una gestión eficaz y sostenible de los recursos hídricos, así como la asignación necesitan de la cooperación y la coordinación entre los diversos actores y jurisdicciones del sector (UNESCO-WWAP, 2012).

El hombre desde su presencia en la tierra ha utilizado las aguas subterráneas que brotan por los manantiales. Estas aguas que en un principio tenían un uso casi exclusivo para beber, con el transcurso de los siglos se extendió a otras actividades que el hombre iba incorporando y que requerían de la disponibilidad de agua para su subsistencia; es el caso de la agricultura de regadío o la industria (Antonio et al., 2009).

Estos recursos hídricos son renovables pero limitados, y como el agua es un elemento fundamental para la vida del hombre y los animales, esa limitación se está haciendo sentir más intensamente cada día, aun en aquellos países que cuentan con abundancia de los mencionados recursos. Esta situación se debe, fundamentalmente, al crecimiento de la población y al desarrollo científico-técnico del mundo moderno, y

que todavía más en las regiones áridas y en los países del mundo subdesarrollado, que todavía no han alcanzado su independencia política y económica (Franco, 2001).

La utilización del agua subterránea se ha venido incrementando en el mundo desde tiempos atrás y cada día gana en importancia debido al agotamiento o no existencia de fuentes superficiales ya que es utilizada para el abastecimiento de agua potable, tanto en viviendas individuales, como en aglomeraciones urbanas, en proyectos agropecuarios para riego y para uso animal; igualmente, muchas industrias consumidoras de grandes cantidades de agua hacen uso de este recurso.

El agua subterránea tiene importancia también como componente esencial del ciclo hidrológico y como reserva fundamental. A escala de todo el globo terrestre las reservas en agua están distribuidas aproximadamente de la siguiente forma: de dichas aguas el 97.2% es agua salada y sólo el 2.8% es agua dulce que se reparte a su vez en el 2.2% en agua superficial y el 0.6% en agua subterránea. Del agua superficial el 2.15% está en los glaciares, el 0.01% en lagos y el 0.0001% en ríos y en corrientes. Del 0.6% correspondiente a agua subterránea el 0.3% resulta económicamente explotable y el resto se encuentra a profundidades mayores de 800 m, lo que hace poco viable su extracción para fines prácticos (Pecoso, 2015).

Dado el interés económico que supone el aprovechamiento del agua subterránea en el mundo es enorme, pues la misma no posee organismos patógenos y por ello no necesita ser tratada previamente, con el consiguiente menor coste al no pasar por depuradoras, su temperatura es constante, lo cual es una gran ventaja si se ha de utilizar para intercambios térmicos o como termorregulador, no posee ni turbidez ni color, su composición química es generalmente constante, los volúmenes de agua subterránea almacenada son por lo general mayores que los volúmenes almacenados en superficie, por lo que el abastecimiento a partir de aguas subterráneas no suele verse afectado por las sequías prolongadas y por ello surge la vital importancia de estudiar su localización, captarlas y conocer el volumen disponible para establecer medidas logrando una mejor distribución del preciado recurso (Juan Gil Montes).

En Cuba el potencial hídrico de Cuba asciende a 38,1 km³, de los cuales 31,6 km³ (73,4%) corresponden a las aguas superficiales y 6,5 km³ (26,6%) a las aguas subterráneas (Duque, 2012).

Después del triunfo de la Revolución y fundamentalmente durante las décadas del 70 y 80 del siglo pasado, empresas que pertenecían al actual Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos y con el apoyo de especialistas de países del desaparecido Campo Socialista, realizaron estudios hidrogeológicos de los principales acuíferos cubanos permitieron elaborar los denominados Esquemas Regionales Precisados y mediante estos se hicieron evaluaciones de los recursos hidráulicos subterráneos de estos acuíferos y que en la actualidad se siguen utilizando como si fueran verdades absolutas (Valdez, 2011).

En el archipiélago cubano se le concede suma importancia al agua, reconociendo los retos y desafíos que presenta el recurso dentro en el planeta. Durante más de seis décadas el país ha trabajado en el rescate de la voluntad hidráulica, espacio en el cual un tema de importancia nacional ha sido la preservación de las aguas subterráneas, por ello son mayores los esfuerzos realizados por los especialistas, para promover el cuidado de la misma como garantía de la salud de la población. Para nuestro país el desarrollo de los recursos hídricos contribuye a la productividad económica y el bienestar social (Cáceres, 2016).

La provincia de Cienfuegos consta de una gran riqueza de agua subterránea, dadas las características geográficas posee 7 cuencas hidrogeológicas como son: (CF1 Hanábana, CF2 Juraguá, CF3 Abreus, CF4 Cartagena, CF5 Lajas, CF6 Cienfuegos, CF7 Cumanayaguas), las principales estudiadas son la CF1, CF2 y CF3 por ser las de máximas extensiones y poseer los mayores volúmenes de aguas disponibles para los distintos polos presentes en la región.

En el caso de estudio la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana está comprendida por parte del municipio de Aguadas de Pasajeros, Abreus y Rodas. Estos municipios poseen una economía basada en la producción agraria con más influencia en la siembra de diferentes cultivos entre ellos el arroz, la papa, fijoles, boniato, malanga y

caña de azúcar mayormente, todos directamente dependiente de la explotación del recurso subterráneo.

En este territorio se desconoce el volumen real por zonas de los recursos explotables debido que el área ha sido poco investigada desde el punto de vista hidrogeológico (Cala, 1993), por lo anteriormente expresado el Departamento de Aprovechamiento Hidráulico, perteneciente a la Empresa de Recursos Hidráulicos de la provincia de Cienfuegos necesita conocer la disponibilidad existente en la cuenca subterránea.

La presente investigación se posee como **Campo de investigación** la hidrogeología tomando como **Objeto de estudio** la disponibilidad del agua subterránea en la cuenca CF1 Hanábana.

Problema de investigación

¿Cómo obtener la disponibilidad de agua subterránea en la cuenca hidrogeológica Cf1 Hanábana mediante una detallada distribución por zonas o sectores a partir de herramientas computacionales facilitando a la Empresa Provincial de Aprovechamiento Hidráulico realizar el balance hídrico con los diferentes usuarios?

Como solución adelantada a este problema se tiene la siguiente **hipótesis**: Si se realiza la sectorización de la cuenca CF1 Hanábana se podrá definir el volumen de agua subterránea disponible y así determinar la posibilidad de realizar balances en mayor o menor medida con los diferentes usuarios.

El **objetivo general** en el que se sustentará la investigación será obtener la disponibilidad existente en la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana a partir de definir sectores o zonas que posibiliten la utilización del método de cálculo de Bínberman usando la fórmula simplificada del mismo para facilitar el manejo en el balance del recurso hídrico.

Como **objetivos específicos** los siguientes:

1. Definir los sectores hidrogeológicos.
2. Identificar los pozos que serán evaluados en el estudio.
3. Caracterizar la zona o lugares donde se encuentran ubicados los pozos.

4. Evaluar los resultados a partir de una base de datos en Excel y luego procesarlos en los softwares Mapinfo 10.5 y Sufer 11.2.

Valor Práctico de la investigación:

Uno de los aportes prácticos que brinda esta tesis en el campo de la investigación es la sectorización de la cuenca Hanábana, lo que permitirá obtener como resultado final el recurso explotable por zonas y el de la cuenca en general a partir de la utilización de herramientas de sistemas de información geográfica que le permiten a la empresa de Recursos Hidráulicos de Cienfuegos conocer la situación hidrogeológica actualmente de la cuenca para la toma de decisiones al realizar un análisis profundo de los volúmenes existentes al llevar a cabo un mejor planeamiento del uso del agua.

La presente investigación estará estructurada de la siguiente forma:

Capítulo 1: Revisión bibliográfica y estudio de los antecedentes.

En este capítulo se hace una búsqueda y recopilación de la bibliografía directa o indirectamente relacionada con el tema de estudio, referente a los antecedentes existentes en el mundo, nuestro país y locales sobre el cálculo del volumen disponible y aprovechable en cuencas subterráneas.

Capítulo 2: Materiales y Métodos.

En este capítulo se selecciona y caracterizan los pozos que serán evaluados en el estudio para luego procesar las muestras del estudio a partir de software computacionales de Sistemas de Información Geográfica.

Capítulo 3: Resultados de la investigación.

En este capítulo se evalúan los resultados obtenidos en el capítulo anterior.

Para el logro de esta investigación se trazaron las siguientes **tareas de investigación:**

- Realización del estudio bibliográfico referente a los antecedentes y estado actual del tema de investigación.
- Obtención de los niveles estáticos en los pozos que serán evaluados en el estudio.

- Caracterización de la zona o lugares donde se encuentran ubicados los pozos: (hidrografía, clima, geología y obtención parámetros hidráulicos presentes en la cuenca).
- Elaboración de una base de datos en Excel sobre el comportamiento de los niveles estáticos de los pozos de estudio en la cuenca y luego procesarlos con la ayuda de los programas computacionales Mapinfo 10.5 y Surfer 11.2.
- Cálculo del volumen real explotable en la cuenca Cf1 Hanábana.
- Análisis e interpretación a partir de mapas temáticos.

Capítulo1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTUDIO DE ANTECEDENTES.

Los estudios sobre la distribución espacial y volumétrica del agua subterránea sirven de base en la toma de decisiones sobre el balance y uso de este recurso natural. Las características generales de las masas de agua que se encuentran bajo la superficie y su disponibilidad forman parte de las tareas planteadas a las entidades gestoras del recurso agua en los distintos países.

1.1 Generalidades sobre los Acuíferos y las Aguas Subterráneas.

El agua subterránea es agua subsuperficial que ocupa vacíos presentes en formaciones geológicas, y constituye una de las fases o etapas del ciclo del agua. La cantidad de agua subterránea almacenada en las formaciones geológicas y la facilidad con la cual puede extraerse depende de dos factores físicos: la porosidad y la permeabilidad.

El agua subterránea es la mayor fuente de agua dulce disponible, por lo cual más de la mitad de la población mundial la utiliza para su consumo; además posee un gran número de ventajas, ya que tiene excelente calidad natural, pues en general es libre de patógenos, color y turbiedad, y puede ser consumida directamente sin tratamiento, o luego de realizarse un tratamiento sencillo; está ampliamente distribuida y se pueden desarrollar sistemas de abastecimiento en lugares muy próximos a los sitios donde se presenten las necesidades, evitando así la construcción de grandes sistemas de distribución; sus fuentes son confiables y en general no se afectan ante la presencia de sequías cortas; y puede incrementarse su desarrollo con el tiempo, de esta manera se evita la necesidad de almacenar grandes cantidades de agua (Otálvaro).

1.1.1 Características geológicas de un Acuífero

Cuando se aborda el término agua subterránea se refiere al agua infiltrada por el interior de la tierra que se desplaza lentamente por gravedad a través de materiales porosos saturados del subsuelo hacia los niveles más bajos hasta encontrarse con algún estrato impermeable lo que implica que no puede continuar su movimiento y comienza su acumulación formando lo que se conoce como *Acuífero*.

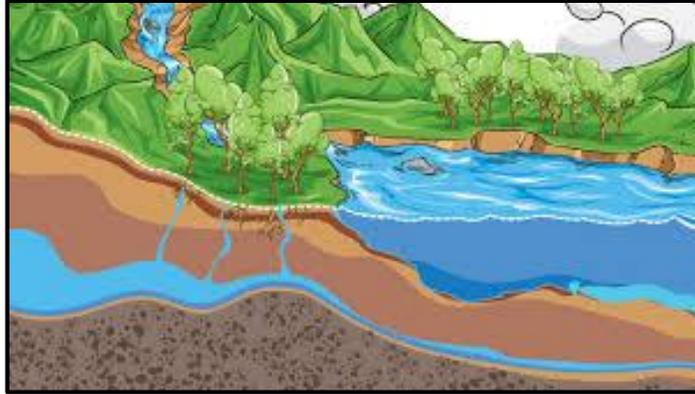


Figura 1.1. Imagen de un acuífero. (Tomada de internet).

Los acuíferos tienen dos características fundamentales: capacidad de almacenar agua subterránea y capacidad de permitir el flujo del agua subterránea. Pero el grado en que se presentan estas propiedades varía mucho de una formación geológica a otra y su magnitud puede variar con la estructura geológica, de unos cuantos km^2 a muchos miles de km^2 .

De acuerdo con (Franco, 2001) los espacios huecos intersticios que presentan las rocas que componen los acuíferos, pueden ser poros o vacíos intergranulares, como el caso de rocas formadas por depósitos sedimentarios granulares (grava y arena) consolidados o no, o fracturadas, fisuradas y canales de disolución. Las formaciones geológicas que constituyen acuíferos se pueden incluir en uno de los dos grupos existentes que ha hecho que algunos autores europeos como (Castany, 1967) y (Schneebeli, 1966) hablen de rocas, terrenos de permeabilidad por porosidad y permeabilidad por fisuración.

1. Acuíferos formados por depósitos no consolidados.
2. Acuíferos formados por rocas consolidadas.

Los acuíferos formados por depósitos no consolidados, están constituidos por materiales sueltos, fundamentalmente, arenas, gravas o mezclas de ambas de origen geológico muy diverso.

Tipos de acuíferos (clasificación).

De acuerdo con (Yague) atendiendo a los materiales que lo componen se pueden considerar diferentes tipos de acuíferos:

- *Acuíferos Porosos*: Están constituidos por materiales sueltos no consolidados (gravas y arenas, generalmente). El agua circula con facilidad por los poros o espacios que dejan entre sí las partículas sólidas.

- *Acuíferos Fisurados*: Están constituidos por rocas consolidadas, en donde el agua circula por las fisuras y grietas formadas en las mismas. Algunas rocas (tales como las calizas y dolomitas) bajo determinadas condiciones son solubles al agua, con lo cual las fisuras se agrandan, formando conductos y cavidades de considerable tamaño, fenómeno que recibe el nombre de karstificación.

Según (Franco, 2001) los acuíferos se pueden clasificar en cuatro tipos de acuerdo al grado de presión a que está sometida el agua.

1. Acuíferos libres, freáticos o no confinados.
2. Acuíferos confinados o artesianos
3. Acuíferos semiconfinados
4. Acuíferos semilibres

- *Acuíferos libres*: Son aquellos en que el agua subterránea presenta una superficie libre, sujeta a la presión atmosférica, como límite superior de la zona de saturación. Está formado por un estrato permeable parcialmente saturado de agua que yace sobre otro estrato impermeable o relativamente impermeable. Se recarga local y directamente en su área de ocurrencia.

- *Acuíferos confinados o artesianos*: Son formaciones geológicas permeables, completamente saturadas de agua, confinadas entre dos capas o estratos impermeables o prácticamente impermeables (una inferior y otra superior). En estos acuíferos el agua está sometida a una presión mayor que la atmosférica, donde al perforar un pozo el agua se eleva por encima de la capa superior hasta alcanzar un nivel denominado *nivel piezométrico*.

- *Acuíferos semiconfinados*: Son acuíferos completamente saturados sometidos a presión que están limitados en su parte superior por una capa semipermeable (Acuitardo) y en su parte inferior por una capa impermeable (Acuicierre o Acuífugo) o también por otro Acuitardo.

- Acuíferos semilibres

Representan una situación intermedia entre un acuífero libre y uno semiconfinado. La capa confinante superior es un estrato semipermeable o acuitardo, de características tales que la componente horizontal del flujo no se puede ignorar.

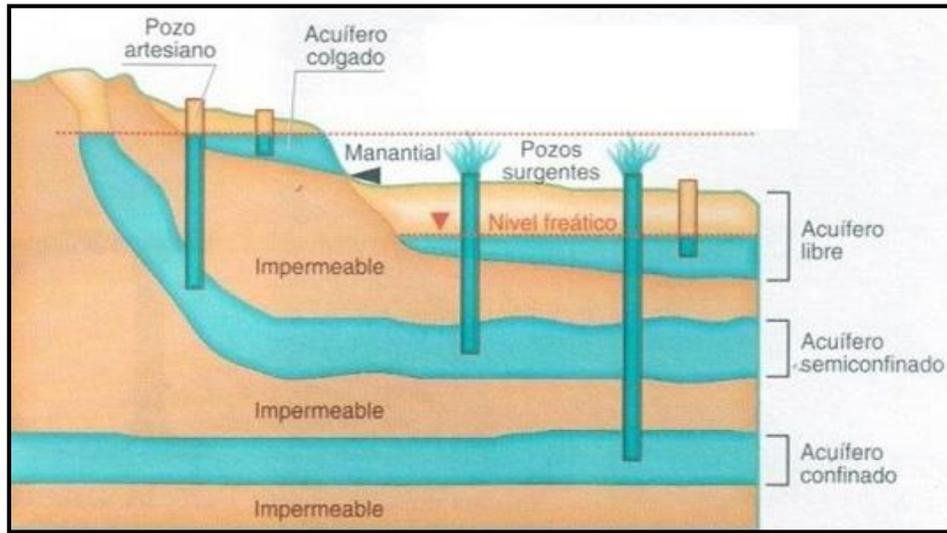


Figura 1.2. Representación de los distintos tipos de acuíferos. Fuente <http://www.areciencias.com/ecologia/aguas-subterráneas>.

Clasificación del agua presente en los suelos.

Teniendo presente lo planteado por (Silvia Angelone, 2006) la movilidad del agua en una masa de suelo, puede realizarse una clasificación de la misma en las siguientes categorías:

Agua Absorbida: es el agua ligada a las partículas del suelo por fuerzas de origen eléctrico, no se mueve en el interior de la masa porosa y por tanto no participa del flujo.

Agua Capilar: Es aquella que se encuentra sobre el nivel freático en comunicación continua con él. Su flujo presenta una gran importancia en algunas cuestiones de Mecánica de los Suelos, tales como el humedecimiento de un pavimento por flujo ascendente y otras análogas.

Agua de Contacto: Es la que se encuentra sobre el agua capilar. La masa de suelo no está saturada.

Agua Libre, Gravitacional o Freática: Se encuentra bajo el nivel freático en comunicación continua con él. Las presiones neutras son positivas. El agua, bajo el efecto de la gravedad terrestre puede moverse en el interior de la masa de suelo si otro obstáculo que le impone su viscosidad y la trama estructural del suelo.

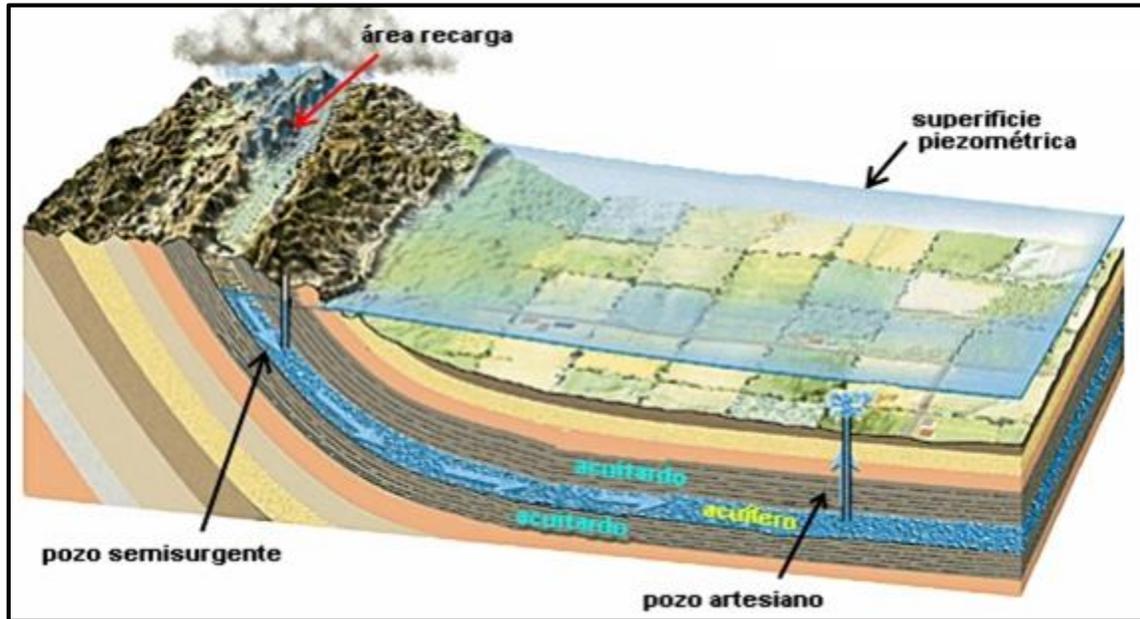


Figura 1.3. Representación 3D de un Acuífero. Fuente (Tarbuk Edward, 1998).

Recargas y descargas en los Acuíferos.

La recarga a un acuífero puede definirse como el agua que alcanza las reservas subterráneas. Este concepto es importante para estudios de recursos hídricos y para estudios de transporte de contaminantes (Otálvaro).

Otros autores como (Balek, 1988) plantean que la recarga se puede definir como la entrada de agua dentro de la zona saturada donde comienza a hacer parte de las reservas subterráneas, esta entrada puede darse de dos maneras, por un movimiento descendente del agua debido a las fuerzas de gravedad y luego de presentarse un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo.

Los distintos tipos de recarga a un acuífero puede darse naturalmente debido a la precipitación, a las aguas superficiales, es decir, a través de ríos y lagos, o por medio de transferencias desde otras unidades hidrogeológicas o acuíferos; pero también

puede darse de manera artificial producto de actividades como la irrigación, fugas de redes de abastecimiento o por infiltraciones de embalses y depósitos (Balek, 1988, Custodio, 1997).

El conocimiento de las áreas de recarga o descarga en una cuenca o en un sistema es de gran importancia para realizar un manejo sostenible de los sistemas acuífero y para determinar zonas de depósitos radioactivos (zonas bajas de recarga), zonas de descarga de desechos (áreas de descarga), o para definir zonas vulnerables a la contaminación (áreas de recarga en lugares de altitud elevada) (Scanlon, 2002).

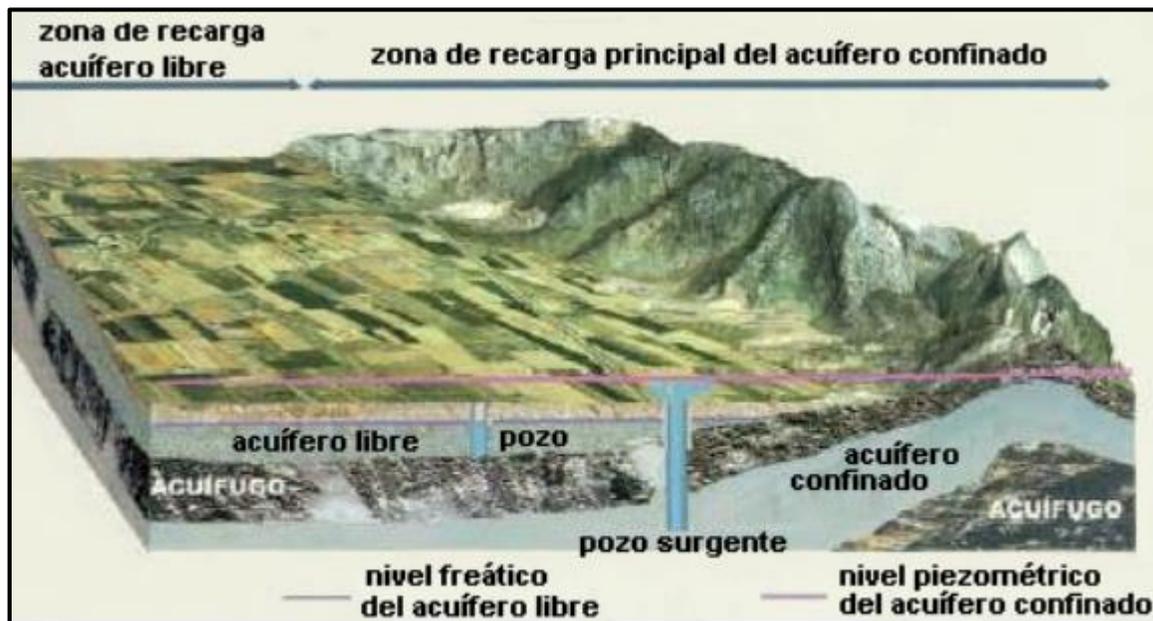


Figura 1.4. Representación 3D del Acuífero, Tipos de acuíferos y Zonas de recarga. Fuente [http:// www.ieev.uma.es/agua/temario.htm](http://www.ieev.uma.es/agua/temario.htm).

1.2 Características de los parámetros hidráulicos.

De acuerdo con (Gálvez, 2011) la propiedad de los acuíferos de contener agua, está gobernada por varios factores: porosidad, permeabilidad, transmisibilidad específica y coeficiente de almacenamiento.

Porosidad (n)

Como las rocas no son completamente sólidas (poseen grietas o espacios intergranulares), y al conjunto de estas aberturas o intersticios se le llama porosidad. La porosidad no define la existencia del acuífero, sino que además se requiere de

estos estén interconectados; característica que se ve afectada por los factores siguientes:

Grado de comparación del material, forma y arreglo de las partículas y su gradación, las cuales son independientes del tamaño de las mismas. El valor de "n", varía de 0 a 50%, dependiendo de los factores mencionados.

En la figura 1.5, se representa a las partículas del suelo (círculos amarillos) y subterráneas (azul flechas). Es de esta manera como llega el agua superficial hacer parte del agua subterránea, que se almacena en suelo y forman los acuíferos.

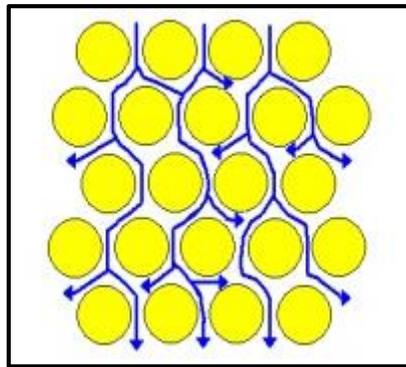


Figura 1.5. Representación de los poros en el suelo. (Tomada de internet)

Permeabilidad (K)

Es la propiedad de las rocas de permitir o no el flujo del agua; es decir, un estrato geológico siendo poroso puede contener agua, pero si los espacios vacíos no se interconectan, el agua no circula.

Esta libertad de movimiento depende de: tamaño y forma de las partículas, gradación del material y viscosidad del agua. El coeficiente de permeabilidad de un material, se define como el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo, a través de una sección de acuífero de área unitaria (1 m^2), cuando el gradiente hidráulico es unitario y la temperatura este en promedio de 15°C . La permeabilidad tiene dimensiones de velocidad $\text{m}^2/\text{día}$ o $\text{m}^3/\text{día}/\text{m}$.

Transmisibilidad o Transmisividad (T)

Es una medida de la capacidad de un acuífero para conducir agua o transmitir agua, definiéndose como el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo, a través de una franja vertical de acuífero de ancho unitario, extendida en todo el espesor saturado, cuando el gradiente hidráulico es unitario y a una temperatura de 15°C (Arocha, 1980).

La Transmisividad es el producto de la conductividad hidráulica y el espesor saturado del acuífero:

$$T = m \times K \quad (1)$$

Donde:

m : ancho del estrato (unidad de longitud).

K : conductividad hidráulica (unidad de longitud/ unidad de tiempo).

Conductividad hidráulica (K)

Un medio tiene conductividad hidráulica K de longitud unitaria por unidad de tiempo, si transmite en la unidad de tiempo un volumen unitario de agua a través de una sección de área unitaria perpendicular a la dirección del flujo y bajo un gradiente hidráulico unitario. Según el tipo de material de los suelos se pueden obtener los valores de conductividad hidráulica (ver tabla 1).

Tabla 1.1. Valores de la conductividad hidráulica según el tipo de material del suelo.

Tipo de Material	K saturación (m/día)
Suelo Arcilloso	0,001 - 0,2
Cama de arcilla	$10^{-8} - 10^{-2}$
Arena Fina	1 - 5
Arena Media	5 - 20
Arena Gruesa	20 - 100
Grava	100 - 1000
Arena y Grava mezclada	5 - 100
Arcilla, Arena y Grava	0,001 - 0,1

Coefficiente de Almacenamiento (μ):

Es adimensional. Se refiere al volumen que es capaz de liberar el acuífero al descender en una unidad el nivel piezométrico (o la presión). Se define como el volumen de agua que puede ser liberado por un prisma vertical del acuífero, de sección igual a la unidad

y altura la del espesor saturado, si se produce un descenso unidad del nivel piezométrico.

En acuíferos confinados los valores típicos se encuentran entre 0.00005 y 0.005, mucho menores que la porosidad eficaz de un acuífero libre (ver abajo). Esto se debe a que en un acuífero confinado el agua no es liberada por el drenaje de los intersticios sino por la compresión del acuífero, en particular de las capas de arcillas y limos intercaladas, (por eso también denominado coeficiente de almacenamiento elástico), y todo el material acuífero permanece saturado.

En un acuífero libre: $S = 0'05 - 0'03$

En acuíferos confinados: $S = 10^{-3} - 10^{-5}$

1.3 Evaluación de los Recursos Subterráneos.

Según (Quintanilla, 2010) la capacidad de un acuífero y su volumen depende de:

1. Características geológicas.
2. Contornos de la formación acuífera.
3. Hidrología superficial de la cuenca superyacente.
4. Condiciones de alimentación.

De acuerdo con el criterio de dos escuelas hidrogeológicas con respecto a que caudal puede extraerse y durante qué tiempo de un acuífero, la europea lo hace con el concepto *Recursos Explotables* y la norteamericana con la *Producción o Caudal*.

Reserva: Cantidad de agua almacenada en un acuífero que drena por la acción de la gravedad, expresada en unidades de volumen y reflejando un carácter estático.

- Reserva permanente (V_p) Corresponde a la reserva mínima media.
- Reserva total ($V_t - V_p$) Nombrada por otros autores Reserva reguladora

Reserva Mínima: Cantidad de agua almacenada en un acuífero limitada por la superficie piezométrica mínima. Tiene cierta correspondencia con el caudal mínimo del escurrimiento subterráneo.

Reserva máxima: Cantidad de agua almacenada en un acuífero limitada por la superficie piezométrica máxima. Tiene correspondencia con el caudal máximo del escurrimiento subterráneo.

Variación de la reserva: Es la diferencia de volumen entre la reserva máxima y la mínima.

Recursos: Volumen de agua disponible para la explotación de un acuífero, expresados en unidades de caudal y como consecuencia refleja un carácter dinámico.

- Recursos disponibles (QD): Representan el volumen de agua que podría extraerse permanentemente a largo plazo del acuífero sin que experimente una reducción de la reserva permanente, expresado en término de caudal. Estos recursos dependen fundamentalmente de la alimentación neta del acuífero y es costumbre asociarlo al caudal escurrimiento subterráneo bajo condiciones de equilibrio natural (Qs).
- Recursos explotables (QE): Volumen de agua que se puede captar de un acuífero a largo plazo sin originar alteraciones indeseables en el régimen de las aguas subterráneas teniendo en cuenta condiciones técnicas y económicas, expresado en término de caudal. La concepción de las obras de captación influye notablemente en estos recursos así como el propio efecto de la explotación.

Según (Quintanilla, 2010) existen varios métodos para determinación de los recursos subterráneos basados en la alimentación de los acuíferos, en la descarga subterránea y en el cambio de almacenamiento.

En la escuela europea rusa, Lazvin, Borevskii y otros, emplean una la variante del balance hídrico de un acuífero para estimar los recursos explotables para ello toman en cuenta variables como coeficientes de utilización de recursos y reservas, recursos naturales, reservas naturales, recursos artificiales y recursos atraídos.

Otros autores como Castany consideran que el método de las fluctuaciones del nivel de la superficie puede aplicarse en condiciones naturales o de explotación pero solo en acuíferos libres ya que implica la variación de las reservas y recursos disponibles.

Los métodos de escurrimiento subterráneo, hidráulicos, hidrodinámicos e hidrológicos también ofrecen distintas vías para estimar los recursos explotables a partir de parámetros hidrogeológicos que intervienen en la obtención del volumen del recurso hídrico como son: porosidad, la permeabilidad, la velocidad y dirección de flujos de las aguas subterráneas.

Para evaluar la cuenca subterránea en este trabajo, según las metodologías existentes en Cuba, se aplicará el método de balance en el caso de estudio a partir de conocer que fundamentalmente se basa en las evaluaciones de entradas y salidas del acuífero haciendo énfasis en las evaluaciones de entradas.

Los principales elementos de entrada y salidas naturales están dados por la precipitación (Prec.), el escurrimiento superficial (Esup), la infiltración (Inf), la Evapotranspiración (Evt) entre otras variables.

1.3.1 Balance de agua.

Se entiende por Balance de las aguas subterráneas (BAS), a la suma algebraica de los ingresos (entradas) y los egresos (salidas) de los volúmenes de aguas para un período determinado, que en la mayoría de los casos equivale a la cantidad total de agua acumulada en la corriente subterránea.

Puede entonces definirse como:

$$\text{Volumen} = \text{Ingresos} - \text{Egresos}$$

Ingresos:

- (P) - precipitaciones (un % de estas), o sea, infiltración o alimentación.
- (Rsup) - recarga por agua superficial (escurrimiento) de ríos, lagunas, etc.
- (Rart) - recarga artificial por pozos, aguas residuales, embalses, etc.
- (Rrec) - recarga por recirculación de riego.
- (Tac) - trasvase de aguas de acuíferos colindantes.
- (Ajv) - aguas juveniles o vírgenes.

Egresos:

- (Ex) - explotación o extracción de los pozos.

(Evt) - evapotranspiración.

(Esm) - escurrimiento natural al mar.

(Esr) - escurrimiento natural a ríos, lagunas, etc.

(Tva) - trasvase a otros acuíferos.

De acuerdo con (Peñalver, 1999) en la ecuación general de ingresos y egresos son muchas las variables o incógnitas a determinar, es por ello que se referirá a la variante del Balance que es más factible de aplicar, de acuerdo a la simplificación de sus cálculos y a las condiciones propias de este trabajo.

El método o variante más desarrollado en Cuba ha sido el de las oscilaciones de los niveles de las aguas subterráneas, creándose un nuevo enfoque conocido como el Gráfico de Balance de las Aguas Subterráneas (GCBAS).

Este método parte de la fórmula de las oscilaciones del nivel, y de las deducciones que se hicieron con referencia a igualar ésta con Darcy modificado, de donde salieron otras que son novedosas y se adaptan a los cálculos necesarios.

El llamado Gráfico de Balance, no es sólo un gráfico como tal. Es un complejo proceso de cálculo de magnitudes del balance interno del acuífero, de variables y requisitos técnicos del régimen, establecidos para lograr una metodología de evaluación, que agrupa tablas, gráficos, fórmulas de cálculo.

Para evaluar las distintas variables y parámetros, para obtener un gasto o recurso de explotación en el caso presente, se utilizara el *Método de las Oscilaciones de los Niveles de las Aguas Subterráneas* o *Método de Bínderman* usando la forma simplificada del mismo para flujo lineal en cuencas no confinadas o libres (Peñalver, 1999).

Fundamento del Método de Bínderman.

De acuerdo con (Quintanilla, 2010) Bínderman, 1970, reseña dos métodos propuestos por Kamenski. El primer método utiliza fórmulas de régimen permanente para los cálculos de la alimentación por precipitaciones y el segundo, de régimen impermanente, en el que la exactitud recae en el valor de la porosidad efectiva (PE), y no en el valor de la conductividad hidráulica, K , como en el primer caso.

El fundamento del segundo método lo constituye la aplicación de la ecuación de continuidad, expresada en términos de volumen, y basada en el conocimiento de los niveles de tres pozos situados en una misma línea de corriente en un acuífero libre bajo flujo lineal. En definitiva, Bánderman propone usar la siguiente expresión simplificada para estimar la percolación neta o infiltración eficaz:

$$P_N = P_E \cdot (\Delta H / \Delta t) \quad (1.2)$$

Donde:

P_N : Percolación neta (longitud²/tiempo).

P_E : Profundidad estática (longitud).

ΔH : Altura aparente de alimentación (longitud).

Δt : Variación del tiempo.

Para tener en cuenta, de forma aproximada, la descarga se supone que este flujo subterráneo sigue la misma tendencia reflejada de la curva de nivel estático durante el período anterior al incremento del nivel, en un tiempo igual al considerado para el aumentado, o sea:

$$P_N = P_E \cdot (\Delta H + \Delta Z / \Delta t) \quad (1.3)$$

Donde:

ΔZ : Altura aparente de la descarga (longitud).

En la figura 1.6 se hace referencia al comportamiento del nivel estático con la representación de los distintos parámetros de alimentación o descarga.

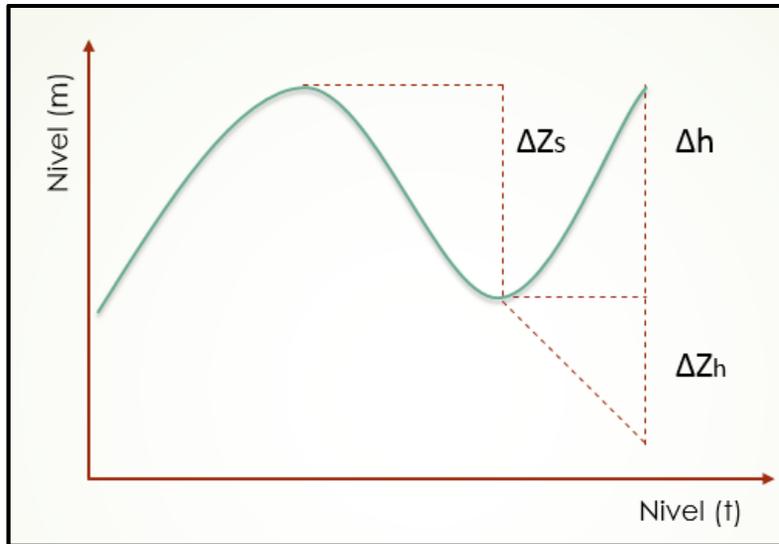


Figura 1.6. Curva del comportamiento del nivel estático del acuífero.

Donde:

Δh = Recarga neta.

Δz_s = Descarga del periodo seco.

Δz_h = Descarga del periodo húmedo.

De estos parámetros se obtienen:

$$\Delta H = \sum \Delta h + \Delta z_h \quad (1.4)$$

$$\Delta Z = \sum \Delta z_s + \Delta z_h \quad (1.5)$$

Estos dos parámetros representan el balance interno del acuífero y tienen implícito todas las variables de entradas y salidas que intervienen en el proceso de estudio, pero se aplicarán los cálculos en base a las variables de entradas (ΔH).

Hallados estas variables se podrá verificar si el acuífero está en equilibrio dinámico, para ello debe calcularse el **coeficiente** β , el cual no es más que el coeficiente de capacidad útil y está expresado por:

$$\beta = \frac{h}{\Delta H} \quad (1.6)$$

Donde:

h : Altura de oscilación hiperanual.

ΔH : Altura media de alimentación aparente.

β : Coeficiente de capacidad útil.

Donde se comprobará Si: $\beta < 2$ el acuífero está subexplotado.

$\beta > 2$ el acuífero está sobreexplotado.

En el caso de que $\beta < 2$, el nivel crítico se encontrará por debajo del máximo nivel registrado históricamente, por lo que hay que calcular el nivel mínimo admisible partiendo de la fórmula de Armesto Pons, la cual exponemos a continuación:

$$N_{adm.} = \text{Nivel más bajo registrado históricamente} + (2\Delta H - h) \quad (1.7)$$

Si por el contrario $\beta > 2$, entonces el nivel máximo registrado está por debajo del nivel crítico, lo que implica que se tiene que buscar en toda la serie de niveles y escoger aquel valor que permita que la relación $\frac{h}{\Delta H}$ sea aproximadamente o igual a dos.

En el caso de estudio, al realizarse una serie de mediciones en un corto período de tiempo (enero-abril), no se tiene una secuencia histórica por lo que se tomará como nivel crítico para cada sector el mínimo nivel medido en las pruebas de campo y por tanto no se tendrá en cuenta si el acuífero está en equilibrio dinámico. Al darle seguimiento al estudio se podrá obtener el nivel admisible real con el que se comporta la cuenta para un tiempo determinado.

1.3.2 Cálculo del volumen disponible.

Para el cálculo del volumen se aplicará la fórmula:

$$V = \mu * \Delta H * F * \lambda \quad (1.8)$$

Donde:

V: Volumen de entrada o alimentación.

μ : Coeficiente de almacenamiento, (adimensional).

F: área de la cuenca o zona de cálculo, (km²).

λ : Porcentaje de explotación en el campo.

1.3 Distribución y usos del agua en Cuba.

En Cuba la disponibilidad del agua, se encuentra en estrecha dependencia de la ubicación geográfica relacionada con la estacionalidad climática y el régimen de precipitaciones, donde casi el 80% de los aportes de lluvia ocurren en el período lluvioso (mayo a octubre).

La evaluación de los Recursos Hídricos en Cuba según fuentes del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH). Ministerio de la Construcción (MICONS) diciembre (2008), a continuación, se muestra los siguientes indicadores:

- Los Recursos Hídricos Potenciales se evalúan en 38,1 km³, de los cuales el 83% (31,7 km³) corresponde a aguas superficiales y el 17% (6,5 km³) a aguas subterráneas (ver figura 7).
- Los Recursos Hídricos Aprovechables se evalúan en 23,9 km³ correspondiendo el 75% a las aguas superficiales y el 25% restante a las aguas subterráneas. Este volumen determina, como límite, un índice de 2 126 m³ por habitante al año calculado para la población del año 2008.
- De acuerdo a las obras hidráulicas construidas y a las condiciones creadas para la explotación, los Recursos Hidráulicos Disponibles ascienden a 13,7 km³, siendo las aguas superficiales el 67% con un volumen de 9,2 km³ y las aguas subterráneas el 33%, con un volumen de 4,5 km³. Esta cifra total representa el 57% de los Recursos Hídricos Aprovechables.

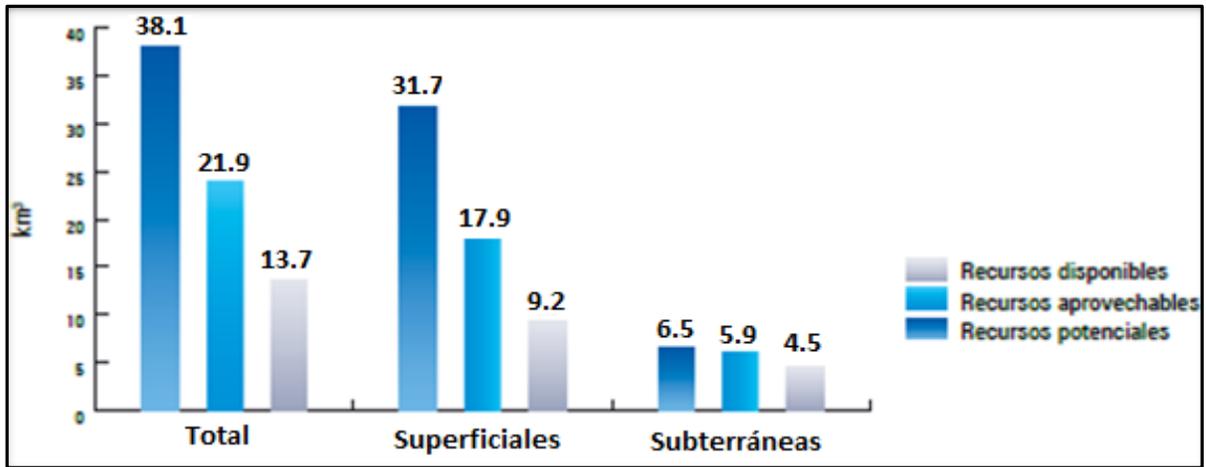


Figura 1.7. Evaluación de los recursos hídricos en Cuba. (Tomada en internet).

De este potencial solo son aprovechables 24 km³ y de ellos están disponibles 13,6 km³, con una mayor incidencia en las aguas superficiales (67%) ((Julio) 2005). 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, 2007).

Según (Mesa and Barrueco, 2009) el 67% del territorio nacional está constituido por formaciones cársicas y en este porcentaje se localizan las 165 cuencas, zonas y tramos hidrogeológicos más importantes, los cuales cuentan con abundantes recursos y un área acuífera efectiva elevada. La mayoría de las cuencas abiertas al mar, se caracterizan fundamentalmente por tres factores vitales que hay que tener en cuenta: el considerable volumen de reservas existentes, la facilidad de captación de las mismas por la poca profundidad de los acuíferos y, por último, la calidad de las aguas que las hacen aptas para múltiples usos y exigencias, a continuación, se muestran los usos del agua en Cuba y sus principales usuarios.

De acuerdo con (Pecoso, 2015) la distribución de estos recursos no es igual, equitativa, en todo el territorio nacional. Así, la zona occidental es la que presenta un mayor peso o volumen de aguas subterráneas (60% de los recursos disponibles evaluados). La región central, desde Villa Clara hasta Camagüey, presenta el 34% de

los recursos subterráneos disponibles, quedando para la región oriental el 6%. Hay provincias como Matanzas y Ciego de Ávila así como gran parte de Artemisa, Mayabeque y La Habana que prácticamente dependen del agua subterránea de forma exclusiva.

El costo relativamente bajo y la buena calidad natural del agua subterránea son factores más que suficientes que justifican la preferencia que se le da en el suministro de agua potable.

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.

La extracción hídrica total de Cuba, del conjunto de sectores agrícola, poblacional e industrial para el 2013, alcanzó los 6 959 millones de m³, destacando el sector agrícola con una extracción de 4 519 millones de m³, equivalente al 65% del total de las extracciones. Las extracciones para el sector poblacional alcanzaron los 1 700 millones de m³, o el 24 % del total, y las extracciones para el sector industrial alcanzaron los 782 millones de m³, o el 11 % del total. Además, existe un gasto ecológico en los ríos regulados 395 millones de m³, que ha de tenerse en consideración.

En (Agua., 2010) se observaron posibles impactos en los recursos hídricos del archipiélago cubano con mayor incidencia relativa en las disponibilidades cuantitativas el recurso agua como son:

1. Cambios en los patrones de comportamiento de las precipitaciones, principal fuente renovable anual del recurso agua.
2. Modificaciones en la dinámica de la relación hidráulica de los acuíferos costeros con el mar, principalmente en la Llanura Sur de la Isla principal, aparejado con un deterioro de la calidad de las aguas subterráneas por el incremento de su contenido salina.
3. Ambos aspectos, pueden influir directamente en la disminución relativa de las disponibilidades de agua, tanto superficial como subterránea, haciéndose más agudas

dependiendo de su localización. En términos nacionales, ya hay evidencias de esa disminución, a partir de los nuevos valores de las precipitaciones.

4. Aparición paulatina de zonas con carencias relativas del recurso agua debido a los efectos del cambio climático.

1.4 El agua en la provincia de Cienfuegos.

La provincia de Cienfuegos cuenta con siete cuencas hidrogeológicas (ver tabla 2), las mismas poseen diferencias en cuanto a su área, calidad del agua, volumen de los recursos almacenados, composición geológica, la pluviometría, entre otras características.

Tabla 2.1. Cuencas hidrogeológicas de la provincia Cienfuegos.

Siglas	Nombres	Área(km²)	Volumen(hm³)
CF-1	Hanábana	980,8	143,36
CF-2	Juraguá	142	13,5
CF-3	Abreus	432	17,5
CF-4	Cartagena	565,2	10,9
CF-5	Lajas	435,2	6,3
CF-6	Cienfuegos	425,7	12,8
CF-7	Cumanayaguas	531,9	7,6

Los ciclos de hiperanualidades de los pozos son influenciados directamente por los regímenes de las precipitaciones, donde las no ocurrencias de estas influyen en los bajos rendimientos de las aguas subterráneas. Los períodos críticos ocurren históricamente cada tres años, al menos si no ocurre un evento extremo (ciclón), siendo el tercero el de los menores valores de precipitaciones (Estupiñan, 2016).

En la provincia se realiza el balance de agua afrontando las demandas hechas por los consumidores, encontrándose dentro de estos: AZCUBA, INRH, MINEM, MINAG, entre otros. Este último es el principal consumidor destacándose las actividades agrarias como: Arroz de frío y primavera, los Granos y el Tabaco, evidenciándose en el balance realizado en 2017 donde se planificaron 349.266 hm³, teniendo al MINAG

que utilizaría el 42.4 % del volumen total contratado, el INRH con el 38.8 %, ambos como los grandes consumidores del producto agua y seguido de AZCUBA con el 8 % del volumen contratado provincial.



Figura 1.8. Principales Organismos para el Balance de Agua. Fuente (Técnica, 2017).

1.4.1 El agua en la Cuenca CF1 Hanábana.

Dada el área de 980.8 km² el agua en la Cuenca Cf1 se encuentra balanceada por la EAH, permitiendo la explotación de sus aguas subterráneas en los periodos secos y húmedos, encontrándose grandemente influenciada por la agricultura, actividad agraria fundamental para el aporte económico a la provincia.

De acuerdo con (Técnica, 2017) la cuenca al tener uno de los cultivos que demandan mayores volúmenes de agua como es el arroz popular, se ha visto involucrada en niveles bajos que al evaluar dicho comportamiento en la Figura 1.16, se tiene una etapa de recarga bien definida que es el período húmedo y la descarga que ocurre en el período seco.

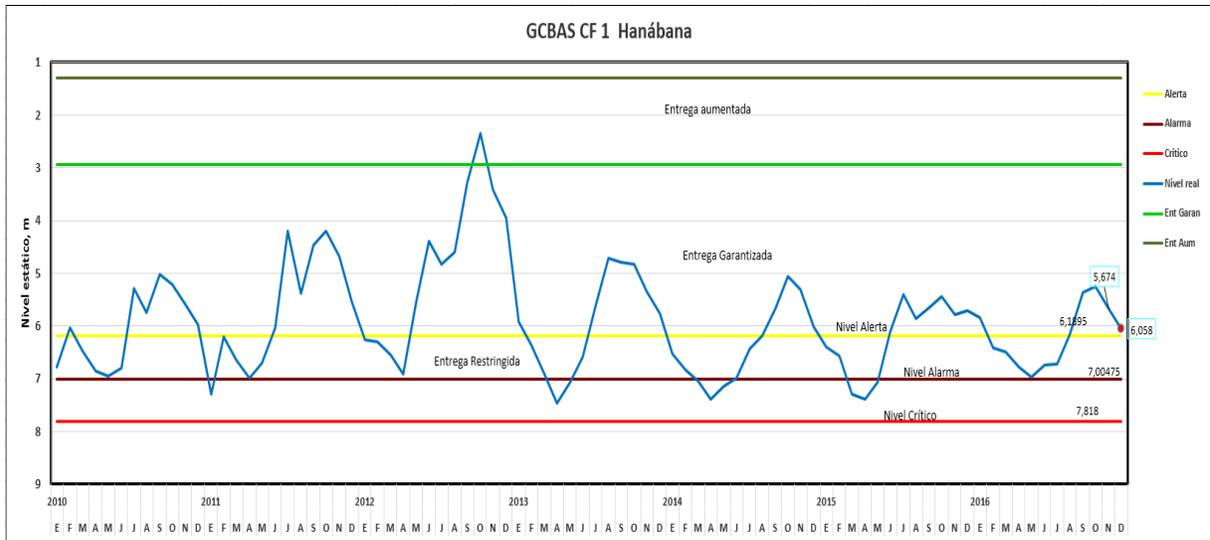


Figura1.9. Gráfico de Control de Balance de las Aguas Subterráneas en la CF1 Hanábana.

Según los cálculos realizados para comienzo del mes de febrero del 2017 existe una disponibilidad de 96,373 hm³ debido al régimen de precipitaciones las que no han favorecido estos volúmenes.

En el año 2017 se planificó un volumen de 120,32 hm³ en el balance permitiendo 120 días de cobertura. Estos días aumentan a medida que las precipitaciones actúen en la recarga de la cuenca por lo que se podrá cumplir con lo planificado en todo el año (Boza, 2014).

1.4.1 Pronóstico del comportamiento de los niveles de la cuenca.

Teniendo en cuenta los volúmenes balanceados se pronostica el comportamiento de la distribución de los niveles de la cuenca como se aprecia en la figura 1.10 durante el período 2010 y enero 2018 por lo que continúa la medida de restricción al 99 % de explotación (Cienfuegos).

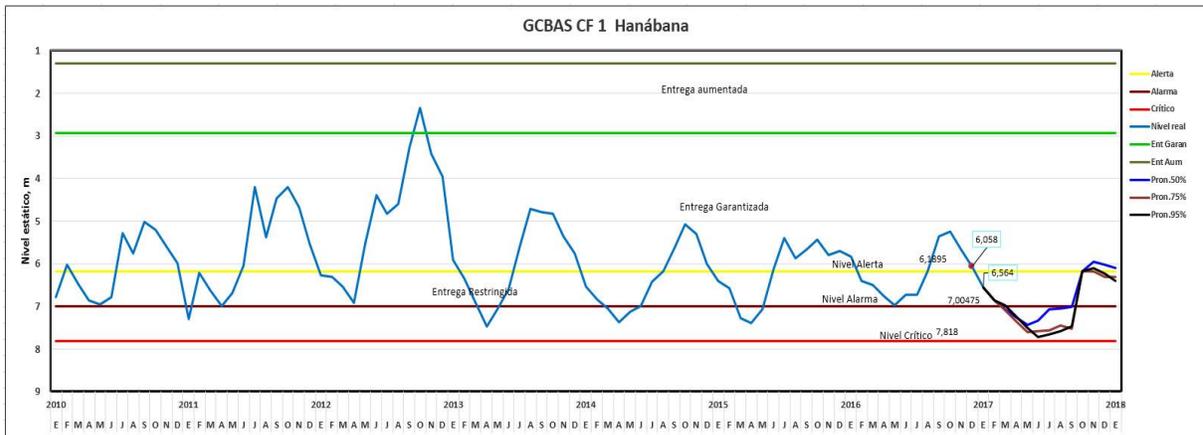


Figura 1.10. GCBAS con el pronóstico de lluvias para el 50%, 75% y el 95% hasta enero 2018 en la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana (EAH, 2017).

1.4.2 Utilización de las Aguas Subterráneas en la Cuenca CF1 Hanábana.

En correspondencia con (Cala, 1993) los recursos de explotación de las aguas subterráneas para el territorio estudiado alcanzan un valor de 145.363 hm³ según los datos suministrados por el Departamento de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos de la DPRH, siendo la extracción promedio estimada entre los años 1987 y 1988 de 140.335 hm³ lo que representó un saldo positivo de 5.028 hm³. La extracción asumida está dada por la información brindada mediante los diferentes usuarios, existiendo una notable diferencia en cuanto a los volúmenes reales de explotación, la misma está basada según las regiones de explotación de 10 hasta 24 horas diarias dependiendo de las actividades agrarias y tipos de cultivos que se siembran en la región.

1.5 Importancia del dato básico Hidrogeológico.

Según (Peñalver, 1999) su importancia estriba en que de la obtención correcta del dato básico depende después el procesamiento secundario de los trabajos a ejecutar desde el punto de vista hidrogeológico y el mismo está sujeto al ordenamiento estadístico, evaluación de los recursos y reservas de las aguas subterráneas, para poder brindar de forma eficaz y segura a las instancias superiores del estado sobre los ascenso y descenso del nivel de las aguas subterráneas así como de la calidad y cantidad del agua en general.

1.5.1 Niveles:

Es la profundidad de yacencia a la que se encuentra el agua subterránea en el acuífero, los niveles pueden ser de dos tipos:

Niveles Estáticos de las aguas subterráneas: Es el nivel del agua subterránea en su estado natural.

Niveles Dinámicos de las aguas subterráneas: Es el nivel del agua subterránea alterada por el bombeo en el mismo punto o cercano a él.

Los niveles pueden ser medidos de tres formas.

1. Manualmente con la ayuda del Tuc-Tuc o Campana.
2. Mediante la utilización de equipos electrónicos (registrador de niveles) Lever Meter.
3. Con la ayuda de Equipos limnigráficos los cuales en Cuba se instalaron varios modelos como son: Valdai, Steven, Metra y GR38. Los cuales pueden ser de frecuencia: mensual, semanal y diaria.

1.5.2 Redes de Monitoreo.

Son aquellas Redes que están fundamentadas en el principio de la territorialidad, para mantener un control sistemático de las cuencas, zonas y tramos hidrogeológicos en lo referente a volumen y calidad de las aguas subterráneas su infraestructura con el desarrollo del país para la elaboración de cálculos de reservas de las aguas subterráneas y la ejecución de los trabajos predestinados (Peñalver, 1999). Es por ello que se distinguen en:

Red informativa.

Red de Sondeo Semestral.

Red Batométrica o de Sondeo Hidroquímico Vertical.

Red Limnigráfica.

Red de Muestreo Simple o Muestreo Físico Químico.

1.6 Generalidades de los Sistemas de Información Geográfica.

Aunque los Sistemas de Información Geográfica (SIG) datan de los años setentas, actualmente siguen vigentes con acercamientos importantes a las nuevas tecnologías de base de datos y una variedad de aplicaciones (Luna, 2010).

Un Sistema de Información geográfica (SIG) es una tecnología basada en computadora de propósitos generales para almacenar, manejar y explotar datos geográficos en forma digital.

Los mismos constituyen una tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial. Se definen como un conjunto de métodos, datos, hardware, software y personal calificado que están vinculados para actuar coordinada y lógicamente en función de lograr efectuar capturas, almacenamientos, análisis, transformaciones y presentaciones toda la información geográfica y de sus atributos, con el fin de satisfacer múltiples propósitos. Según (García. et al., 2010).

1.6.1 Herramientas SIG

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.

Actualmente existe una amplia variedad de estos productos en el mercado, los que pueden satisfacer la mayoría de las necesidades en materia de SIG. A manera de ejemplos, se pueden citar entre los más relevantes a los productos ArcGIS, de ESRI; MapInfo Professional, de PitneyBowes; GeoMedia Professional, de Intergraph; IDRISI, de Clark University Laboratories; AutoCAD Map3D, de Autodesk; Smallworld, de General Electric Energy Corporation; Geomatica, de PCI Geomatics; ERDAS IMAGINE de Leica Geosystems; Microstation GeoOutlook, de Bentley GIS (CUJAE, 2012).

Softwares SIG utilizados.

MapInfo 10.5

Es un potente software de mapeo y análisis geográfico basado en Windows para aplicaciones de expertos en inteligencia de localización. Diseñado para visualizar fácilmente las relaciones entre datos y geografía, MapInfo Professional ayuda a los analistas de negocio, planificadores, profesionales de GIS, inclusive a los que no utilizan GIS, para obtener nuevos insights sobre sus mercados, compartir informaciones de mapas y gráficos y mejorar la toma de decisiones estratégicas

Ventajas del software MapInfo

Pueden automatizar muchos de los procesos de compilación de datos ofreciendo una ventaja apreciable para la concepción general de la modelación del agua subterránea.

Posibilitan la realización de estadísticas espaciales de los resultados que muchas veces ayudan a comprender fenómenos a diferentes escalas y también es muy importante su capacidad para el diseño de mallas que son la base de muchos modelos numéricos que emplean el Método de las diferencias finitas (MDF) y el Método de los elementos finitos (MEF).

ArcGis

Es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. Como la plataforma líder mundial para crear y utilizar sistemas de información geográfica (SIG), ArcGIS es utilizada por personas de todo el mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores del gobierno, la empresa, la ciencia, la educación y los medios. ArcGIS permite publicar la información geográfica para que esté accesible para cualquier usuario (ArcGis, 2017).

Surfer

Surfer es un software con todas las funcionalidades de visualización en 3D, contorno y superficie en un paquete modelado que se ejecuta bajo Microsoft Windows. Surfer se utiliza ampliamente para el modelado del terreno, modelado batimétrico, visualización de paisaje, análisis de superficies, cartografía para el contorno, cuencas hidrográficas, cartografía de superficie 3D y muchas más. Facilita una comprensión completa de los datos. Se usa masivamente para modelado terrestre, modelado”

bathymetric”, visualización paisajística, análisis de superficies, mapeado de contornos, mapeado de lagos y entornos 3d, volúmenes, etc. Las características de modelado 3D de Surfer le permiten modelar y analizar todos los aspectos de sus datos. Utiliza mapas en 3D para distinguir patrones y tendencias que de otra forma se perderían en el espacio 2D.

1.6.1 Empleo de los Sistemas de Información Geográfica.

En el mundo.

En el mundo el uso de los Programas informáticos y de los SIG es muy diverso y difundido, pues la relación costo – beneficio es siempre ventajosa en cuanto a los servicios que prestan para la manipulación de información en tiempo real. Lo cual brinda una rápida actualización, permite ver detalles estructurales en su apariencia física, relacionar la información geoespacial de los objetos y regiones asociadas a las mismas, posibilitando también realizar análisis y hacer sugerencias durante la toma de decisiones, a partir de una base de datos relacionada, en un mínimo de tiempo.(Álvarez, 2005).

Empleo de los SIG en Cuba.

Según criterio de (Álvarez, 2010), la disciplina SIG en Cuba es inmadura, porque los conceptos no están claros y existen problemas fundamentales todavía no resueltos, especialmente la formación, ya que pocos programas de estudios incluían la tecnología SIG en las universidades.

La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica en la gestión de los recursos hídricos subterráneos en Cuba ha permitido una base inteligente para la gestión de los distintos datos ofrecidos por las diferentes ramas en que se aplique esta herramienta. A partir de la necesidad existente del conocimiento básico de nuestras cuencas hidrogeológicas, la implantación de un SIG nos ha permitido realizar caracterizaciones y diagnósticos del recurso hídricos para considerar su uso y su disponibilidad como una fuente vital en proyectos actuales y futuros. En base a la

importancia que tienen las cuencas hidrogeológicas deben efectuarse proyectos con el empleo de los SIG.

Aplicación de los SIG en Cienfuegos.

Danela Raquel Jiménez Cáceres, 2015 realizó una investigación en el municipio de Rodas presentando una aplicación de los Sistemas de Información Geográfica para evaluar la vulnerabilidad de los acuíferos, facilitando su evaluación y ayudando a identificar el grado de deterioro o mejora de un cuerpo de agua a partir de análisis físico-químico, obteniendo como resultados un informe representado en mapas temáticos posibilitando la evaluación de la aguas subterráneas.

Severino Alfonso Hernández, 2016 mediante la creación de un Modelo Conceptual Hidrogeológico en la cuenca Cf1 Hanábana representó espacialmente la interrelación de los elementos que influyen en el acuífero, pozos, focos contaminantes, zonas de protección sanitaria y dirección del flujo subterráneo para posteriormente realizar una evaluación de los pozos y poder descubrir cuál es el origen de las contaminaciones a partir de softwares de Información Geográfica utilizando específicamente MapInfo 10.5 y Surfer.

Rafael Silot Ochoa, 2016 llevó a cabo la caracterización de las aguas subterráneas de la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana mediante el análisis físico-químico utilizando los SIG principalmente ArcGIS 10.1 para de forma ilustrativa y espacialmente mejorar la interpretación de la información contenida en hojas de Excel.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.

El estudio corresponde a una investigación del tipo no experimental descriptiva; el cual se efectuó en la cuenca hidrogeológica CF1 Hanábana dada la importancia que representa dicha cuenca para la provincia por su aporte hídrico a los distintos sectores de la economía, para fines de riego de diferentes cultivos (viandas, cítricos, caña, pastos, y otros), así como para uso socio-industrial y por la gran extensión de masa de agua aprovechable que representa dentro del territorio de Cienfuegos. Para ello se contó con el apoyo de los especialistas de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Cienfuegos y con todo el material e información contenida en las bases de datos ya realizados.

2.1 Sectorización hidrogeológica.

La sectorización de la zona de estudio se realizó tomando las consideraciones de los estudios anteriormente ya efectuado por (Cala, 1993). Para esto se han tenido en cuenta una serie de factores o elementos de una cuenca o acuífero importantes a considerar para su interpretación geológica e ingeniero-geológica en el territorio:

- Litología predominante de las rocas supuestamente almacenadoras.
- Morfología, relieve, accidentes geomorfológicos como desarrollo de formas cársticas.
- Sumideros, ondulaciones o llanuras extensivas, etc.
- Tectónica desarrollada en la zona; fallas, grietas principales, fisuras de rocas.
- Presentan permeabilidad secundaria elevada, etc.
- Forma y tipo de las estructuras básicas.

Se efectuaron ocho sectores buscando la mayor homogeneidad con respecto a las formaciones litológicas, edad y espesor de los estratos que conforman la zona geológica.

Para la conformación de los ocho sectores se tuvo en cuenta que:

1- Tuviesen la misma representación de pozos de acuerdo con la zona dentro de la cuenca.

2- No abarcaran demasiado territorio, ni fueran muy numerosos para poder realizar las pruebas de campo con mayor sistematicidad.

3- Estuviesen dentro de la misma formación litológica.

Además, se tomó como consideración para la sectorización la ubicación espacial de los principales consumidores con el fin de prevenir y tomar decisiones al balancear el recurso hídrico en los períodos secos y húmedos.

2.2 Identificación de los pozos muestreados en la cuenca.

2.2.1 Consideraciones para la selección y establecimiento para la selección de pozos a sondear.

Al regular los requerimientos técnicos tendientes al establecimiento de puntos para sondeos se garantiza una distribución representativa de las oscilaciones de los niveles de las aguas subterráneas.

De acuerdo con (Peñalver, 1999) todo pozo utilizado para las mediciones de los niveles de unas aguas deberá ser diseñado y construido a tal efecto de acuerdo a las especificaciones técnicas básicas siguientes:

Profundidades: Este debe ser de acuerdo al espesor del acuífero y hasta donde alcance la zona de variación de los niveles ello equivale a decir teóricamente que el pozo de observación debe alcanzar una profundidad aproximada a los 2/3 del acuífero, sin embargo esto puede ser excesivo para nuestro carzo cubano.

En acuíferos con grandes espesores (+ de 100m) es innecesaria tal profundidad, ya que los niveles promedios no sobrepasan los 30 - 40 m. por lo que pozos con 50 - 60m son suficientes para cubrir nuestras necesidades.

Diámetro: Para el caso de la medida de los niveles puede servir tanto una cala como un pozo, ya que la sonda utilizada puede pasar fácilmente por ella. Generalmente 0,30 m y 0,50 m, según los equipos existentes en el país.

Construcción: La instalación complementaria del punto, o sea, caseta o modulo base, así como cercado del áreas del equipo, según las especificaciones del Proyecto de Red básica Hidrogeológica.

Accesibilidad: La estación para garantizar tanto la recogida de la información como su revisión y mantenimiento no deben estar situados dentro del área de influencia de bombeo de otros pozos garantizando que el nivel observado sea estático, de no contarse con la posibilidad de construcción de pozos para estos fines, podrán seleccionarse otros puntos ya existentes, siempre y cuando presentes requerimientos técnicos como los anteriormente determinados.

2.2.2 Selección de los pozos de observación.

Dada la importancia que importa esta cuenca, la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico (EAH) ha estado incrementado los pozos de estudios en todo su territorio facilitando un mejor estudio del comportamiento de la misma en las diferentes estaciones climatológicas para tener un control sobre el balance de agua a realizar con los diferentes usuarios tanto mensualmente como anualmente.

En este punto se debe tener en cuenta que sólo se usaron pozos con fines de estudios; solamente en caso de necesidad se usaron pozos de otras actividades, ya que los pertenecientes a la Red Básica algunos se encontraban obstruidos o desaparecidos en la zona, estos pozos escogidos no deben estar influenciados por regímenes de explotación en el acuífero.

La identificación de los pozos que serán evaluados en el estudio se llevó a cabo a través de visitas al campo y datos brindados por especialistas de la EAH y se obtuvo las coordenadas espaciales (x, y) de cada uno de ellos que posteriormente serían procesados a partir de las herramientas de información geográficas Mapinfo 10.5 como se aprecia en el (Anexo 1), dicha herramienta nos brindó de forma ilustrativa y espacialmente la ubicación de los mismos dentro de la cuenca subterránea. Posteriormente se seleccionaron los pozos que estaban incluidos dentro de cada sector hidrogeológico, de los cuales se obtendrían los parámetros hidráulicos de cada sector (Ver Anexo 4).

2.3 Características físico-geográficas la Cuenca CF1 Hanábana.

2.3.1 Características geológicas.

Las características geológicas de la región se tomaron en base al levantamiento en los años 1986-1987 por especialistas checos y cubanos de la Empresa de Geología de Villa Clara y, a la documentación de calas perforadas por la antigua Empresa de Hidroeconomía de Cienfuegos por trabajos anteriormente ya realizados. A partir de esta documentación se confeccionó el mapa geológico de la zona estudiada a escala 1:100,000 y se trazaron nuevos perfiles geólogo-hidrológicos.



Figura 2.1. Actualización del esquema hidrogeológico, Plano Geológico de la provincia de Cienfuegos. Realizado por la Empresa de Hidroeconomía, Villa Clara el 5-1-1983.

En base a estos planos y a la documentación presente en la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico se ha podido obtener la geología de la cuenca hidrogeológica.

La geología de la zona de estudio está constituida por las formaciones geológicas cnb, arb, gn y vr cuya distribución en la cuenca es bastante mayoritaria con respecto a las demás formaciones presentes.

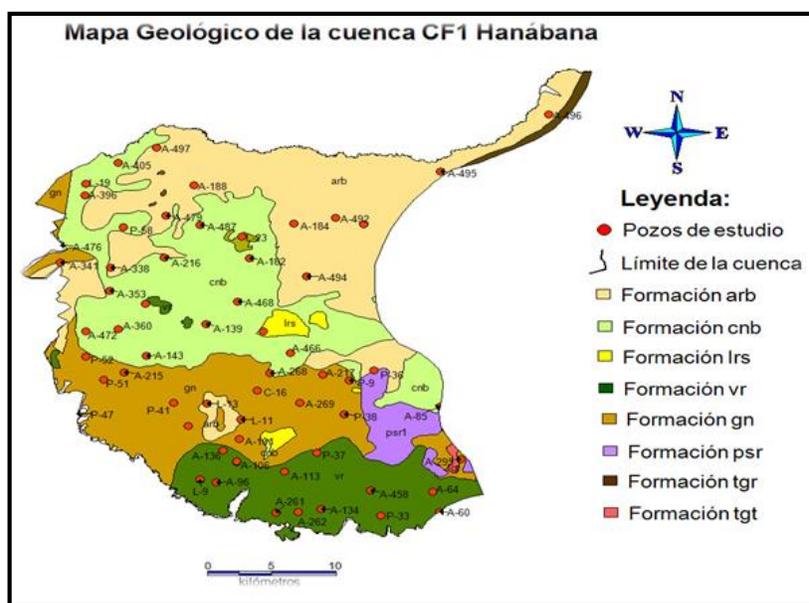


Figura 2.2. Mapa Geológico de la cuenca Cf1 Hanábana. Fuente Autor.

Según (Palenteología, 1998) se presentan algunas de las formaciones principales en la cuenca.

1. Formación Arabos: (arb)

Litología diagnóstica: arcillas illito-montmorillínicas calcáreas, abigarradas, con gránulos de cuarzo, concreciones calcáreas y Ostrea, de color crema, amarillento y gris verdoso; calizas arcillosas, calizas limosas, margas con raras intercalaciones de areniscas arcilloso-limosas de color amarillo rojizas que pasan a limolitas arcillosas; calizas dolomitizadas. Las arcillas contienen a veces gravas polimícticas muy finas y gránulos de pirita.

Edad: Mioceno Inferior parte alta-Mioceno Medio parte baja.

Espesor: oscila entre los 96 y 123 m.

2. Formación Cantabria: (cnb)

Litología diagnóstica: la unidad está constituida por calizas y margas de color cremoso - amarillento, blandas, deleznable. La estratificación de los sedimentos es muy mala; habitualmente tienen textura maciza o nodular.

Edad: Cretácico Superior (Mastrichtiano Superior).

Espesor: 120 m. 40 m en el holoestratotipo.

3. Formación, Villarroja: (vr)

Litología diagnóstica: 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 esmectita y caolinita. La estratificación es poco discernible, localmente lenticular. Tonalidades variables, de rojo amarillento a rojo violáceo.

Edad: De acuerdo a su posición estratigráfica se le ha asignado una edad Pleistoceno Superior.

Espesor: oscila entre 2 y 40 m. Su valor frecuente es de 2-3 m.

4. Formación Guines: (gn)

Litología diagnóstica: calizas biodetríticas de grano fino a medio, duras, en parte compactas, en parte porosas, cavernosas y recristalizadas, frecuentemente fracturadas, fosilíferas, más subordinadamente calizas biohémicas, calizas dolomíticas, y dolomitas, calizas micríticas sacaroidales y lentes ocasionales de margas calcáreas y calcarenitas. La dolomitización es secundaria. La coloración es variable: blanco, Blanco grisáceo, blanco amarillento, blanco rosáceo, amarillento-parduzco, crema, gris claro frecuentemente con manchas rojizas de hidróxido de hierro. Se presentan masivas principalmente o con estratificación gruesa, más raramente mediana o fina. Su superficie se aprecia elaborada con cortes lapides y cubierta de suelos rojos, frecuentemente.

Edad: Mioceno Inferior parte alta-Mioceno Superior Basal.

Espesor: oscila entre los 50 y 1 670 m.

5. Formación, Tinguaro: (tgr)

Litología diagnóstica: Constituida predominantemente por margas de color blanco grisáceo, estratificadas, con intercalaciones de arcillas, calizas arcillosas, que en

ocasiones pueden ser algo detríticas, y limolitas de color gris a gris verdosa. Estas intercalaciones se presentan de forma masiva o con una estratificación gruesa.

Edad: Oligoceno Superior.

Espesor: no mayor de 100 m.

2.3.2 Características topográficas.

La topografía en la cuenca se encuentra distribuida en todo su territorio tomando valores en los rangos desde 1 a 60 m.s.n.m encontrándose hacia el noreste y este las elevaciones de mayor relevancia en el territorio con valores de 40 a 60 m.s.n.m, y hacia la parte sur y suroeste se puede encontrar las menores elevaciones de 1 a 15 m.s.n.m como se aprecia en la figura siguiente.

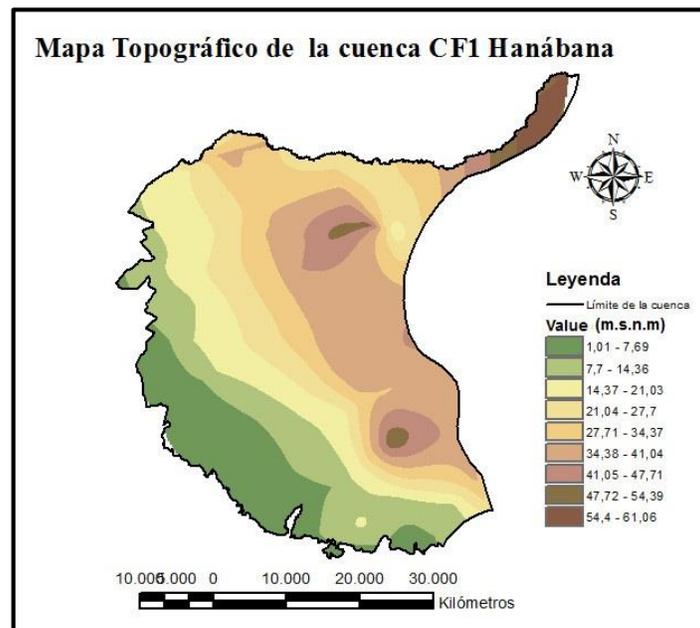


Figura 2.3. Representación de la topografía presente en la cuenca. Fuente Autor.

2.3.3 Características hidrográficas.

Según (Cala, 1993) desde el punto de vista hidrográfico, el territorio está diseccionado por diferentes corrientes superficiales, fluyendo todas más o menos de Norte a Sur, hacia la Ciénaga Oriental de Zapata. Entre las arterias fluviales de mayor importancia podemos citar el río Hanábana que corresponde al límite político-administrativo entre

las provincias de Cienfuegos y Matanzas, los ríos Magdalena, Ceja de Borregos, Yaguaramas, Alcalde Mayor y Ciénaga.

La arteria fluvial más importante es el río Hanábana, de curso perenne, el cual discurre sobre las calizas cavernosas del Mioceno alimentando las aguas subterráneas. Este río corre en dirección Sur, casi latitudinalmente, naciendo en límite de la provincia de Villa Clara en las cotas absolutas de 65-70 m, cerca del parteaguas provincial. Su longitud total es de aproximadamente de 100 km. En su cauce inferior y medio toma muchos afluentes pequeños, que desde el punto de vista del estudio son los arroyos Violeta, Siguanea y Ocuje. Esta arteria fluvial no llega al mar, sino que se pierde en la Ciénaga Oriental de Zapata teniendo un ancho del cauce en los límites de la zona estudiada de 15-20 m (parte superior) que aumenta aguas abajo hasta alcanzar 30-40 m donde en ocasiones puede llegar a tener 3 m de profundidad; en la misma dirección de este río el cauce está rectificado por medio de un canal de drenaje llamado Canal Hanábana.

El resto de los ríos presentan las características de ser temporales, es decir que solo corre el agua durante el período de lluvias debido a sus respectivos cauces, con excepción de la parte Norte donde están difundidas las rocas de baja permeabilidad.

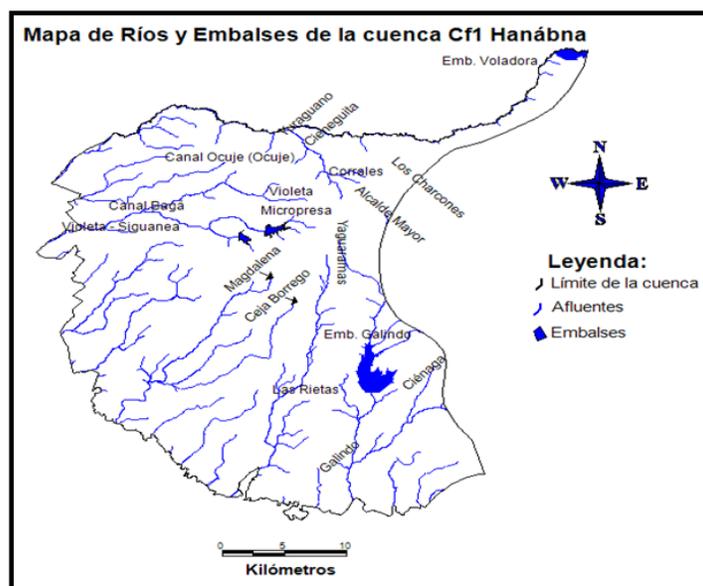


Figura 2.4. Representación de la situación de ríos y lagos en la cuenca hidrogeológica. Fuente Autor.

3.2.4 Características climatológicas

El clima en la región es el característico para todo el territorio nacional y según la situación geográfica de Cuba es un clima tropical, predominantemente marino.

Según las observaciones realizadas en la cuenca, la temperatura media anual del aire es de 25.1°C, alcanzado valores máximos de 36.5°C y mínimos de 3.5°C. Debe señalarse que cuando se manifiesta bien el ritmo anual de la temperatura no es posible señalar estaciones térmicas definidas. La humedad relativa de la atmósfera es elevada con una magnitud del 78%.

Los vientos predominantemente se deben a los alisios que soplan del Noreste (NE) y del Este Noreste (ENE) con velocidades medias de 2.6 m/s o 9.4 km/h.

El factor climatológico fundamental a considerar en el estudio de las aguas subterráneas lo constituyen las precipitaciones atmosféricas, así como la distribución interanual.

Comportamiento de las lluvias en la cuenca.

Sobre la base de la distribución interanual de las lluvias se hizo un estudio detallado ya que se observa una clara división entre el período húmedo, que se extiende desde mayo hasta octubre, y el seco que va desde noviembre hasta abril. El estudio y principalmente las pruebas de campo se realizaron durante el período seco posibilitando la obtención de los niveles más críticos de la cuenca.

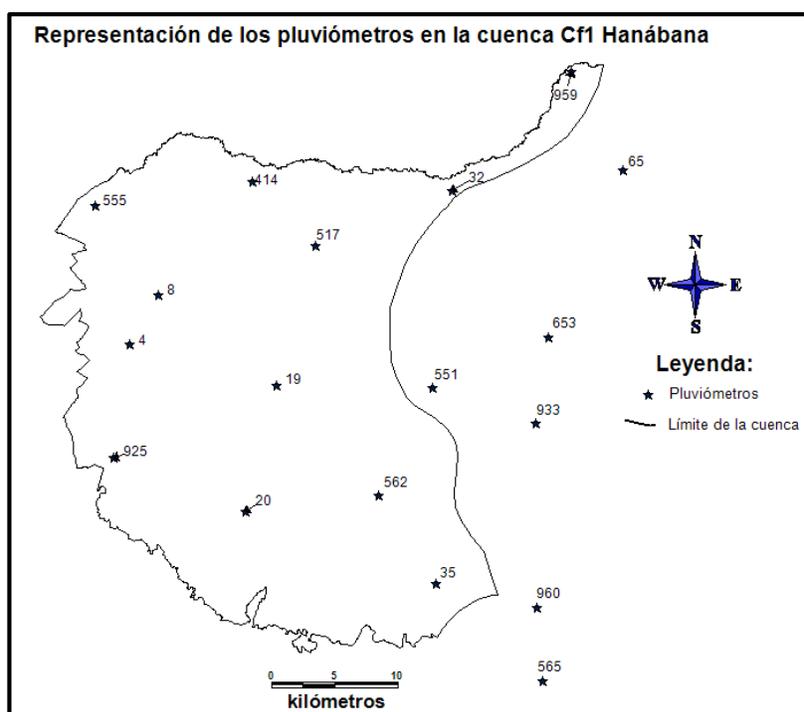
De acuerdo con (Bateman, 2007) los pluviómetros son de los equipos más utilizados para medir la lluvia, presentándose la problemática que solo miden un punto en un área determinada (Ver figura 2.5).

Para la medición de las lluvias en la cuenca subterránea se obtuvo los valores de lluvia en los meses de enero hasta abril registradas en las tarjetas mensuales llenadas por lectores voluntarios en todo el territorio (Ver Anexo 5). Al paso de los años se ha ido perdiendo dicha red pluviométrica por la influencia de diferentes factores, dejando una menor cantidad de pluviómetros de los que debería estar ubicados equitativamente en toda el área de la cuenca.



Figura 2.5. Representación del pluviómetro 19 perteneciente a la red pluviométrica de la cuenca Cf1 Hanábana.

Para el cálculo de la lluvia se efectuó a partir de la información brindada por la red pluviométrica, tomando varios pluviómetros ubicados tanto dentro como fuera de la cuenca para un mejor análisis estadístico como se aprecia en la siguiente figura.



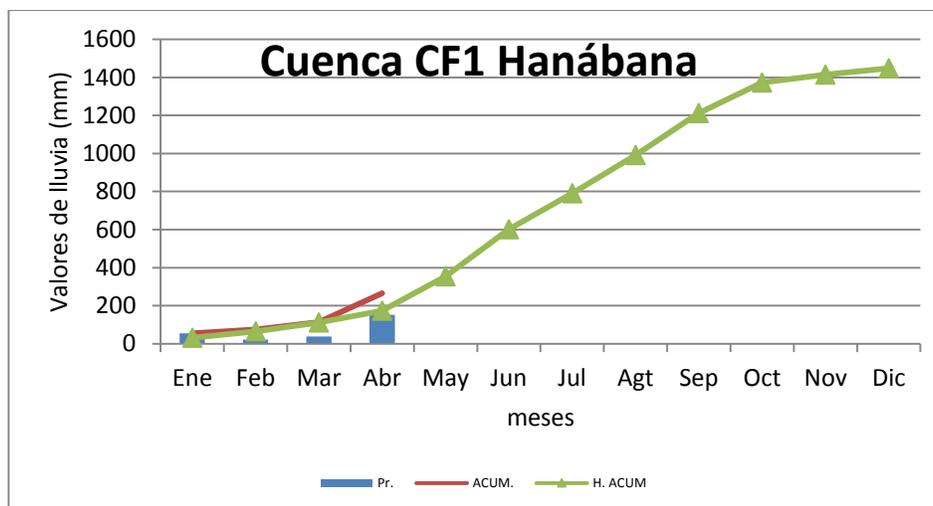


Figura 2.7. Representación de la lluvia promedio, acumulada y el acumulado histórico.

Se hizo un análisis del comportamiento de la lluvia registrada en cada pluviómetro como se muestra en la figura.

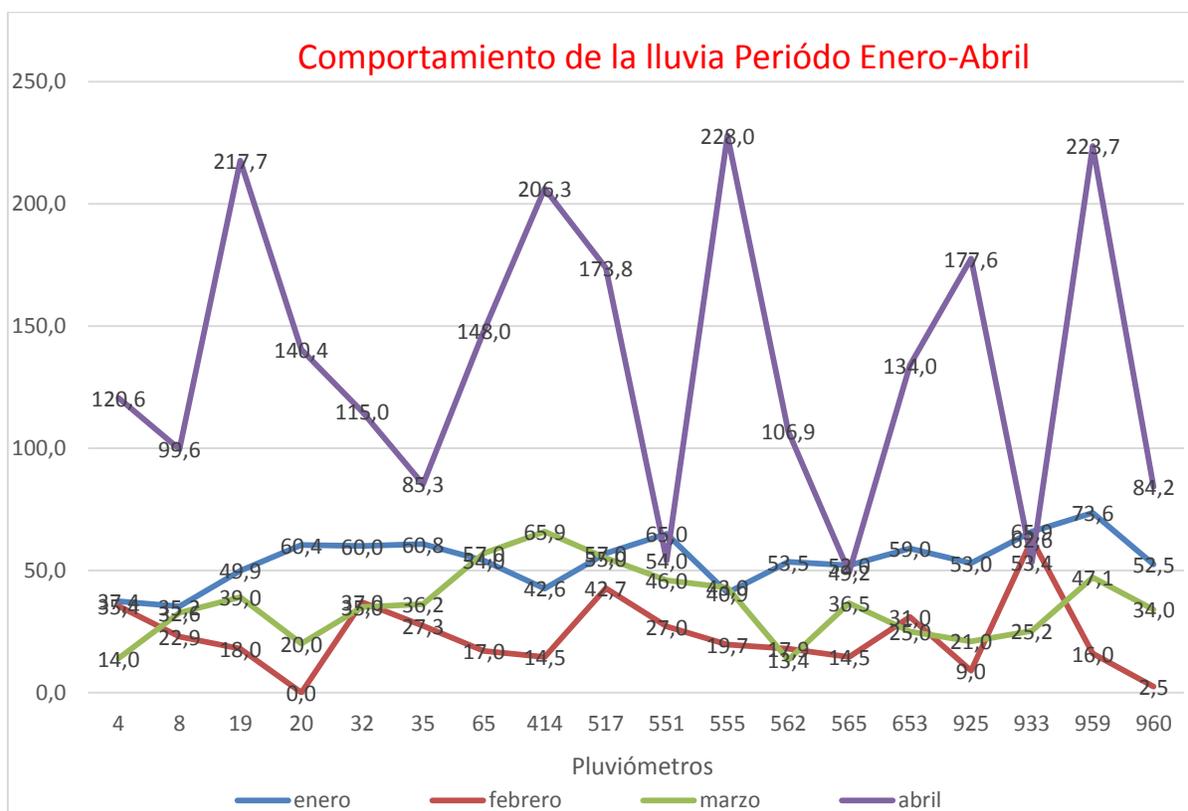


Figura 2.8. Representación del comportamiento de las lluvias por pluviómetros en los distintos meses.

A partir de la herramienta Mapinfo 10.5 y hojas de cálculo en Excel se llevó a cabo el análisis de las lluvias caídas aplicando los métodos de Thiessen (Ver Anexo 6).

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot A_i}{\sum A_i}$$

Donde:

P, Precipitación promedio en la cuenca o región (mm).

P_i, Precipitación en cada uno de los pluviómetros (mm).

A_i, Área de los sectores o zonas en la cuenca (km²).

∑A_i=A_t, Área total de la cuenca (km²).

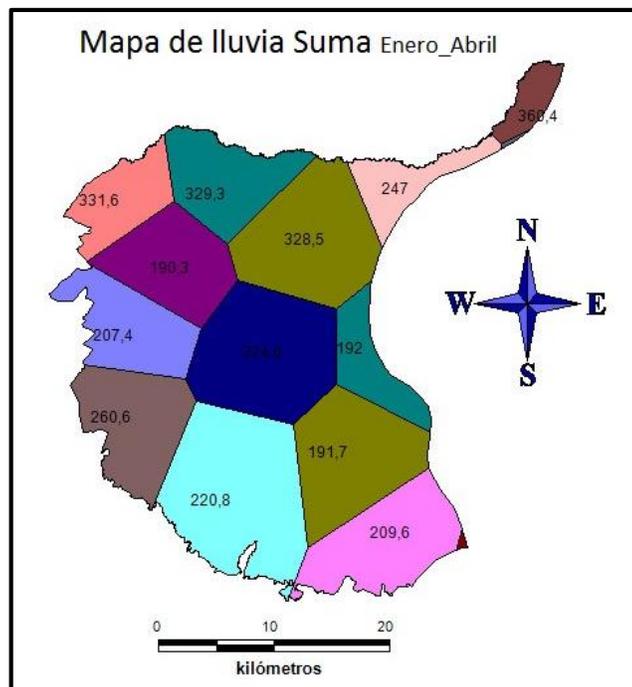


Figura 2.9. Representación de la lluvia registrada por pluviómetros de enero hasta abril. Fuente Autor.

Al trazar los polígonos de Thiessen se miden el área de influencia de cada pluviómetro que tributa a cada sector conociéndose la lluvia media, para el caso de estudio al se obtuvo los mapas de lluvia de los distintos meses (Anexo) lo que permitió elaborar el mapa de lluvia distribuida por los ocho sectores.

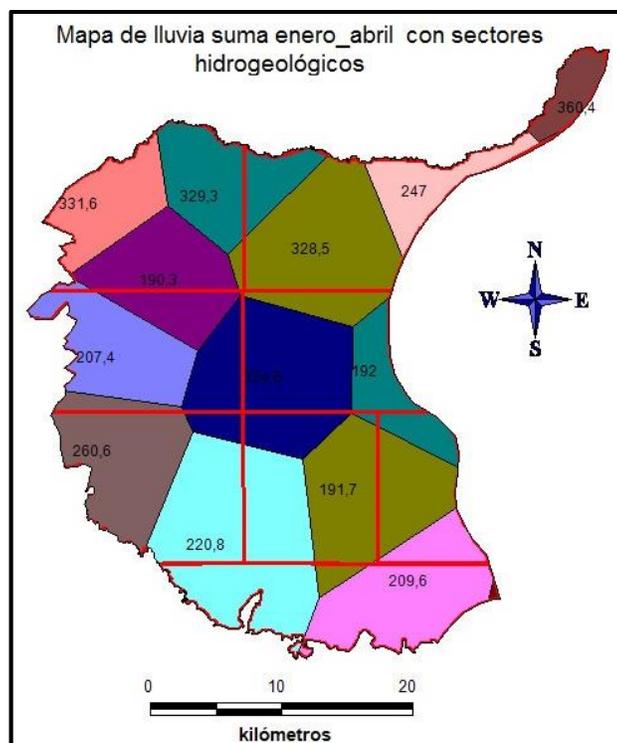


Figura 2.10. Representación de la lluvia registrada por pluviómetros de enero hasta abril con los sectores hidrogeológicos.

Se elaboraron las isoyetas de la cuenca correspondientes a los meses de estudios que nos permitió obtener los valores de lluvia media de cada sector pero forma más general (Ver Anexo 7).

2.4 Comportamiento Hidráulico.

Para la obtención de los valores de los niveles estáticos se llevará a cabo las pruebas de campo realizando sondeos a cada pozo de estudio u observación (figura 2.5) para obtener dicho nivel durante los meses de febrero, marzo y abril para los pozos mensuales y en caso de los semestrales se hicieron muestreos en noviembre y abril del presente año (ver anexo), se hizo énfasis en los pozos mensuales debido a que estos caracterizan el comportamiento de la cuenca y por su ubicación geográfica influyen sobre estos la explotación realizada por las diferentes entidades como: Agricultura y Azcuba, dos de los principales consumidores de aguas subterránea en la provincia.

De acuerdo con (Autores (Grupo Base del GW•MATE), 2002-2006) el estudio realizado a las cuencas subterránea para analizar su comportamiento tanto físico como químico se establece a través de Pozo de observaciones que estas a su vez conforman una red de monitoreo.

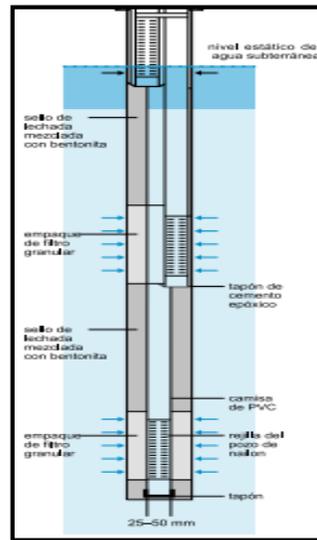
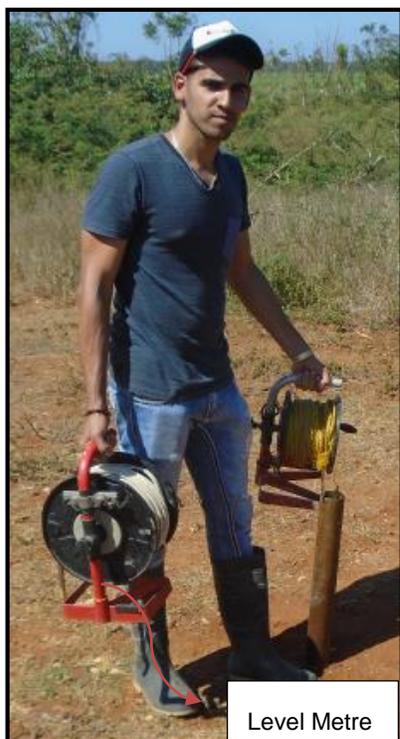


Figura 2.11. Representación de un pozo de observación. Fuente (Autores (Grupo Base del GW•MATE), 2002-2006).

Pozos de Observación: Constituyen estaciones dedicadas exclusivamente al monitoreo, y se ubican y diseñan para detectar cambios potenciales del flujo y de la calidad del agua subterránea.

Una *Red de Monitoreo* está formada normalmente por un conjunto de pozos de observación acoplado con una selección de pozos de extracción. Dicha red se diseña de forma que se tenga acceso a los datos requeridos del recurso de agua subterránea. Los sistemas y redes de monitoreo se



Instrumento utilizado: Level Metre

Level Meter: También conocida como Sondas de Nivel. Es el equipo estándar para la medición del nivel de las aguas subterráneas. Son unidades portátiles que se caracterizan por medir el nivel del agua de una forma sencilla, rápida y precisa. Existen diferentes modelos pero casi todos trabajan bajo el mismo criterio de funcionamiento que es tomar el nivel del agua a partir de una señal (sonora y lumínica) emitida por un sensor al hacer contacto con líquido (Pesa Engineering, 2008).

Figura 2.12. Representación del Level Metre en el campo. Fuente Autor.

Proceso estadístico

En los sectores hidrogeológicos se escogieron los pozos de mayor representación en la zona de modo tal que estos serán capaces de ofrecer todos los parámetros hidráulicos necesarios para los cálculos del volumen de un sector.

Tabla 2.2. Pozos de mayor representación por sectores.

No	Sector	Pozo
1	Sect-I	P-58 y L-19
2	Sect-II	A-275A y L-23
3	Sect-III	P-53 y A-353
4	Sect-IV	A-468 y P-41
5	Sect-V	P-41 y L-13
6	Sect-VI	P-37 y L-11
7	VII	P-80 y A-275
8	VIII	A-270 y L-19

Se realizó el análisis estadístico aplicando el método de la función lineal, mediante la obtención del coeficiente de correlación lineal entre los niveles de los pozos escogidos

como más representativos se pudo deducir si los pozos por sectores estaban interrelacionados con respecto a su nivel estático y así poder asumir el nivel estático del sector como la media de sus niveles.

Para la aplicación del proceso estadístico se obtuvo el nivel estático medio de los meses implicados en el estudio correspondientes a los pozos más representativos de los sectores.

Se introdujo en hojas de cálculo los valores de los niveles estático de los pozos muestreados de cada sector en los distintos meses y se construyó los hidrogramas, que posteriormente serviría para el cálculo de la altura aparente de recarga (ΔH).

Como resultado de la correlación establecida entre los pozos de cada zona se obtuvo:

Correlación Pozo-Pozo

Sector 1

Pozo: L-19	Pozo: P-58
Niveles estáticos	
9,6	8,8
11,0	10,0
11,7	10,2

Coef de correlación 0,98060857

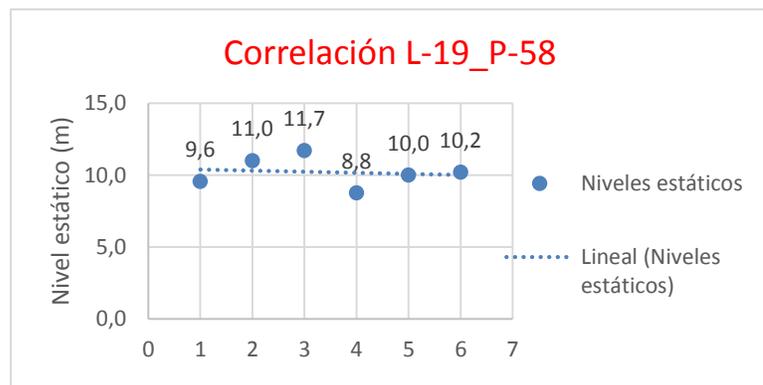


Figura 2.13. Representación de una correlación lineal entre los pozos L-19 y P-58, pertenecientes al sector 1. Fuente Autor.

Debido al anterior análisis se obtiene que estos pozos poseen buena correlación con un 98 % entre sus niveles estáticos por lo que se tomó como nivel estático del sector la media de estos pozos como se observa en la figura.



Figura 2.14. Representación de los niveles estáticos en el período de estudio. Fuente Autor.

El proceso estadístico para el resto de los sectores se lleva a cabo de igual manera como se aprecia en el Anexo 8.

En este el análisis estadístico se tuvo en cuenta la relación existente entre los pozos más representativos de cada sector y los pluviómetros instalados en la cuenca como se muestra en la tabla 2.3, lo que permitió reconocer cual pluviómetro fue el más representativo en cada sector y el de mayor relación con pozo de los sectores, obteniéndose de igual manera el coeficiente de correlación para un mejor análisis.

De igual manera se introdujo los datos en hojas de cálculo, pero referidos a los niveles estáticos de los pozos y los valores de lluvia registrados por los pluviómetros obteniéndose como resultado:

Tabla 2.3. Correlación establecida Pozo-Pluviómetro. Sector 1

Pozo correlacionado	Nivel(m) febrero	Nivel(m) marzo	Nivel(m) abril	Coficiente de correlación	
P-58	8,8	10,0	10,2		
L-19	9.6	11.0	11.7		
Pluviómetros	Lluvia(mm) febrero	Lluvia(mm) marzo	Lluvia(mm) abril		
				P-58	L-19
Lec-414	14,5	65,9	206,3	0,79	0.89
Lec-555	19,7	43,0	228,0	0,684	0.81
Lec-8	22,9	32,6	99,6	0,694	0.82

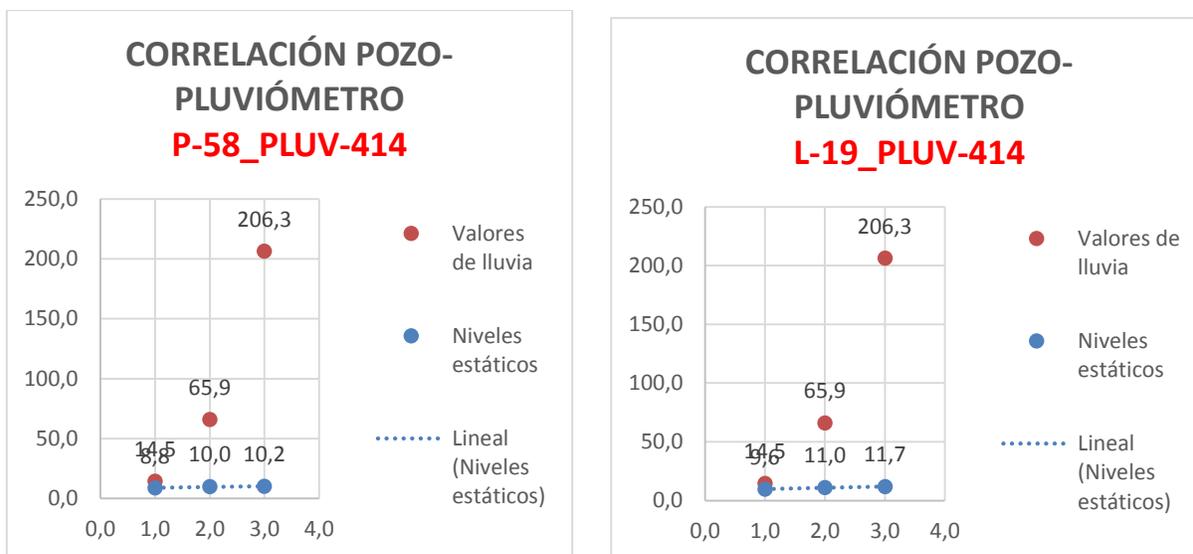


Figura 2.15. Representación de la correlación de los pozos P-58 y L-19 con el Pluv-414.
Fuente Autor.

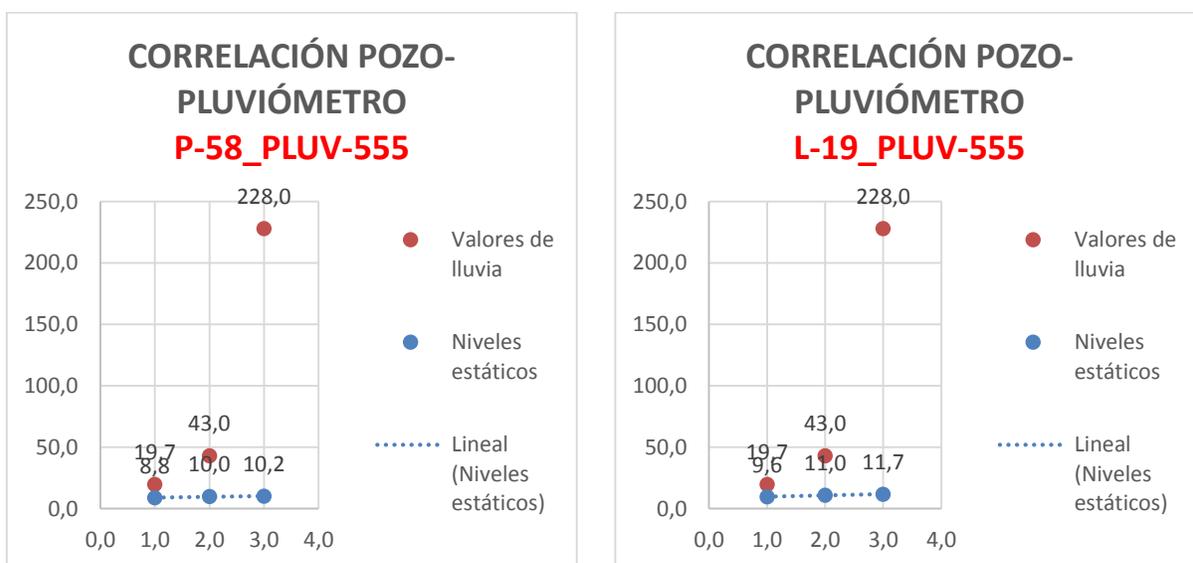


Figura 2.16. Representación de la correlación de los pozos P-58 y L-19 con el Pluv-555.
Fuente Autor.

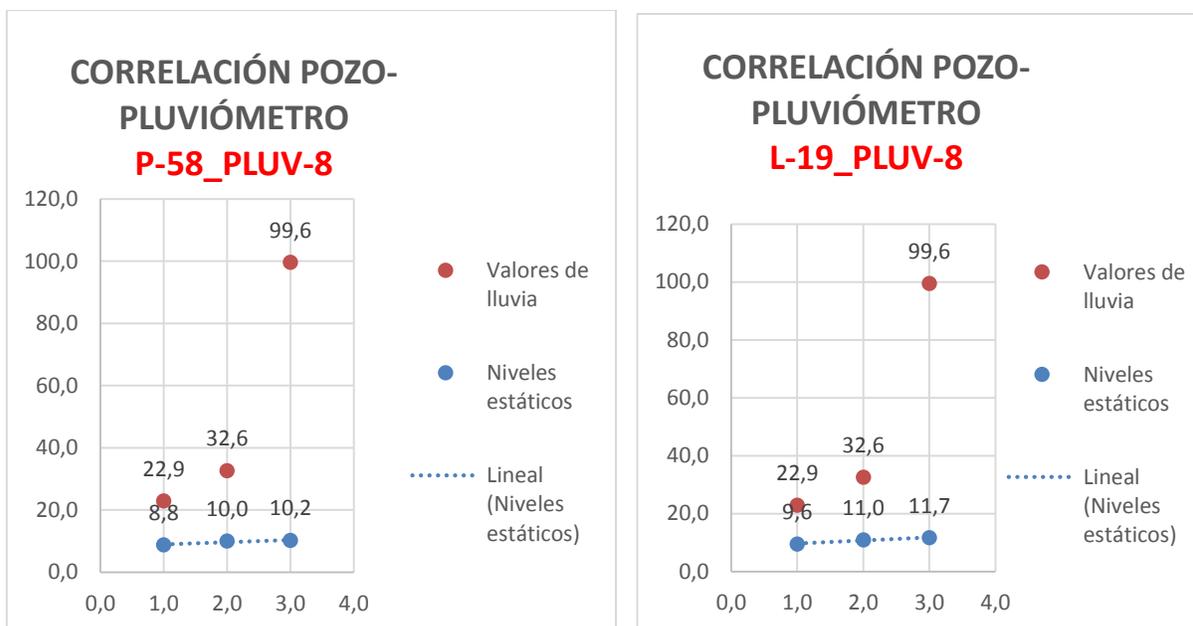


Figura 2.17. Representación de la correlación de los pozos P-58 y L-19 con el Pluv-8. Fuente Autor.

En el caso del sector 1 se obtuvo que el pluviómetro que tuvo más relación fue el Pluv Lec-414 como se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 2.4. Representación de pozos y pluviómetro representativos en el sector 1.

No	Sector	Pozo	Pluviómetro
1	Sect-I	P-58 y L-19	Pluv Lec-414

En el resto de los sectores se realizó el mismo procedimiento estadístico (ver anexo) obteniendo de igual forma los pozos y pluviómetros representativos de los restantes sectores (ver anexo).

2.5 Cálculo del volumen disponible.

Las evidencias geológicas, geofísicas e hidrogeológicas permiten definir que la cuenca Cf1 Hanábana es un acuífero de tipo libre, heterogéneo y anisótropo, en contacto con la Ciénaga de Zapata provocando mayores fuentes de recargas.

2.5.1 Cálculos de los parámetros hidráulicos.

Los parámetros hidrogeológicos que caracterizan las propiedades de filtración de las rocas acuíferas, se determinaron por el estudio de los antecedentes de la cuenca a

partir de la información brindada por la EAH en planos digitales de los cuales se obtuvieron los valores de transmisibilidad, coeficiente de almacenamiento y difusividad hidráulica.

Como anteriormente mencionado los parámetros principales que definen las características hidrogeológicas del área estudiada y que permiten evaluar las propiedades filtracionales de las rocas que conforman los recursos naturales y de explotación de los acuíferos son:

Transmisibilidad

Para el cálculo de la transmisibilidad se ha tenido en consideración el carácter hidráulico del acuífero (Libre o confinado) y el régimen del flujo subterráneo (lineal o laminar).

Teniendo en cuenta que la transmisibilidad es la capacidad de transmitir agua a través de una masa de suelo, influyendo principalmente la geología del mismo lo que permite que con transcurso de los años la transmisibilidad sea considerada la misma.

Según (Cala, 1993) los estudios hechos arrojaron valores de transmisibilidad donde se utilizó el método analítico para condiciones de equilibrio y el grafo analítico en sus distintas variantes para condiciones de no equilibrio. Los resultados obtenidos de la transmisibilidad se ofrecen en los anexos (Anexo).

Por el método analítico se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$T = (0.366 * Q * \log R/r_0) * S_0 \quad (2.1)$$

$$T = (0.366 * Q * \log r_1/r_0) * (S_0 - S_1) \quad (2.2)$$

$$T = (0.366 * Q * \log r_2/r_1) * (S_1 - S_2) \quad (2.3)$$

Llegando a la expresión:

$$T = 100 * q \quad (2.4)$$

Donde, $q = Q/S_0 \quad (2.5)$

Por el método grafo-analítico se utilizó la formula modificada de Jacob.

$$T = 15.81 * Q/\Delta S \quad (2.6)$$

Y la fórmula de recuperación de Theis.

$$T = 15.81 * Q/\Delta S' \quad (2.7)$$

Donde:

Q, Gasto del pozo, L/s.

S₀, Abatimiento en el pozo bombeado, m.

S₁ y S₂, Abatimiento en los pozos satélites, m.

r₀, Radio del pozo central, m.

q, Gasto específico del pozo, L/s*m.

ΔS, Diferencia de abatimiento para un ciclo logarítmico durante el bombeo, m.

ΔS', Diferencia de abatimiento para un ciclo logarítmico durante la recuperación, m.

t, Duración del bombeo, min.

t', Tiempo desde la detención del bombeo, min

Para la obtención de los valores de transmisibilidad por sectores se hizo un análisis profundo a partir del software Mapinfo 10.5 a partir de mapas temáticos elaborados con los anteriores resultados.

Para el cálculo de la transmisibilidad se elaboró el Mapa de Isotransmisibilidad, con los sectores hidrogeológicos (figura) lo que permitió el cálculo de la transmisibilidad por sectores como se observa en la siguiente tabla. Anexo

Tabla 2.5. Valores de transmisibilidad por sectores.

No	Sector hidrogeológico	Transmisibilidad (m ² /d)
1	Sect-I	1367.9
2	Sect-II	102.7
3	Sect-III	1652.4
4	Sect-IV	231.7
5	Sect-V	10500.1
6	Sect-VI	4262.7
7	VII	2125.7
8	VIII	17767.1

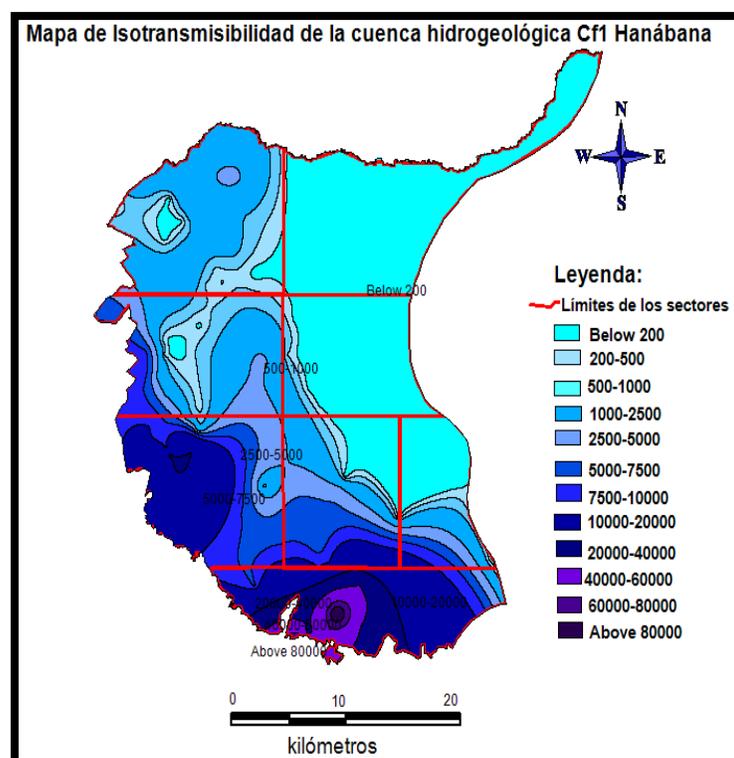


Figura 2.18. Representación del Mapa de Transmisibilidad en la cuenca CF1 Hanábana. Fuente (Sueiro, 2018).

En esta anterior figura se puede indicar que los menores valores de transmisibilidad con valores inferiores a $200 \text{ m}^2/\text{d}$ se encuentra hacia los sectores 2 y 4 principalmente mientras que por otra parte los mayores valores se sitúan hacia los sectores 5, 6 y 8 superándolos valores de $80000 \text{ m}^2/\text{d}$.

Coeficiente de almacenamiento (μ)

Al evaluar directamente el material del acuífero, por medio de sus capacidades hídricas, acuosidad, o rendimiento se tuvo en cuenta la evaluación de la porosidad efectiva o también llamado rendimiento efectivo que no es más que el equivalente a la cantidad de agua que puede aportar un material, después de saturado al máximo y drenado por gravedad (Peñalver, 1999).

El coeficiente de almacenamiento se obtuvo mediante la elaboración del Mapa Temático Geológico de la cuenca posibilitando obtener mediante la interpretación y análisis del mismo la composición del suelo y tipo de rocas más representativos por sectores presentes en la cuenca.

Al realizar la descripción litológica se tuvo que:

En el sector 1 y 2 la litología predominante obtenida fue la Formación (arb), ARABOS. En su diagnóstico litológico se encuentra como principal material la arcilla arenosa para el sector 2 y arcilla arenosa fina y arcillosa para el sector 1.

En el sector 3 y 4 la Formación (cnb), CANTABRIA fue la predominante litología presente en estas zonas, encontrando dentro de su diagnóstico litológico la caliza fundamentalmente.

En el sector 5 y 6 la Formación (gn), GÜINES se obtuvo como litología principal en las zonas, siendo las calizas biodetríticas de grano fino a medio, calizas arcillosas, calizas dolomíticas y dolomitas las principales materiales dentro de su diagnóstico litológico.

En el sector 7 se obtuvo la Formación (psr), PASO REAL como litología, siendo las alternaciones de Las calizas arcillosas, de carácter fosilíferas según el predominio según el diagnóstico litológico las sobresalientes.

En el sector 8 la Formación (vr), VILLARROJA se adquirió como la litología principal de la zona, donde las Arcillas arenosas y areno-limosas son los de mayor predominio según su diagnóstico litológico.

A partir de la tabla que se muestran a continuación se obtendrán los valores del coeficiente de almacenamiento característico de cada pozo o sector. La tabla ha sido tomada íntegramente del Manual Práctico de Hidráulica, Tomo 1, Instituto de Hidroeconomía, MICONS.

Tabla 2.6. Coeficiente de almacenamiento en dependencia del tipo de roca

No	Tipo de roca	M
1	Gravas y arenas gruesas	0.20 - 0.25
2	Arenas de granos medios	0.10 - 0.20
3	Arenas finas y arcillosas	0.05 - 0.10
4	Arcillas arenosas, gravas, arenas con arcilla	0.01 - 0.08
5	Rocas cársicas carbonatadas	0.005 - 0.10
6	Rocas cársicas muy carbonatadas	0.05 - 0.15
7	Areniscas volcánicas y rocas agrietadas	0.002 - 0.05

De la descripción litológica de los sectores se pudo obtener los valores del coeficiente de almacenamiento apoyándonos en la tabla 2.6, según los rangos de los valores del coeficiente de almacenamiento con respecto a la composición geológica del suelo.

Tabla 2.7. Valores de los coeficientes de almacenamiento por sectores.

No	Sectores hidrogeológicos	Rangos Coef Almacenamiento	Valores Coef Almacenamiento
1	Sect-I	0.05-0.1	0.075
2	Sect-II	0.01-0.08	0.045
3	Sect-III	0.005-0.1	0.053
4	Sect-IV	0.005-0.1	0.053
5	Sect-V	0.05-0.15	0.1
6	Sect-VI	0.05-0.15	0.1
7	Sect-VII	0.01-0.08	0.045
8	Sect-VIII	0.05-0.1	0.075

2.5.2 Balance de Agua Subterránea

Para la aplicación a la zona de estudio se elaborará el GCBAS por sectores hidrogeológicos en hojas de excel con el procesamiento de los datos obtenidos en el campo ya que por su concepción teórica, debe ser aplicado sólo al caso de acuíferos libres, sin presión.

En el sector 1 se identificaron ocho pozos, de estos dos de ellos son los que representaron el comportamiento en el sector, por ello se obtuvieron los valores medios de los niveles estáticos de cada mes lo que permitió realizar el GCBAS para la obtención de la recarga neta del sector.

Sector 1

Para la elaboración del GCBAS en el sector 1 se ploteó los niveles estáticos medios obtenidos del procedimiento estadístico de los meses de estudio presentes en la siguiente figura.

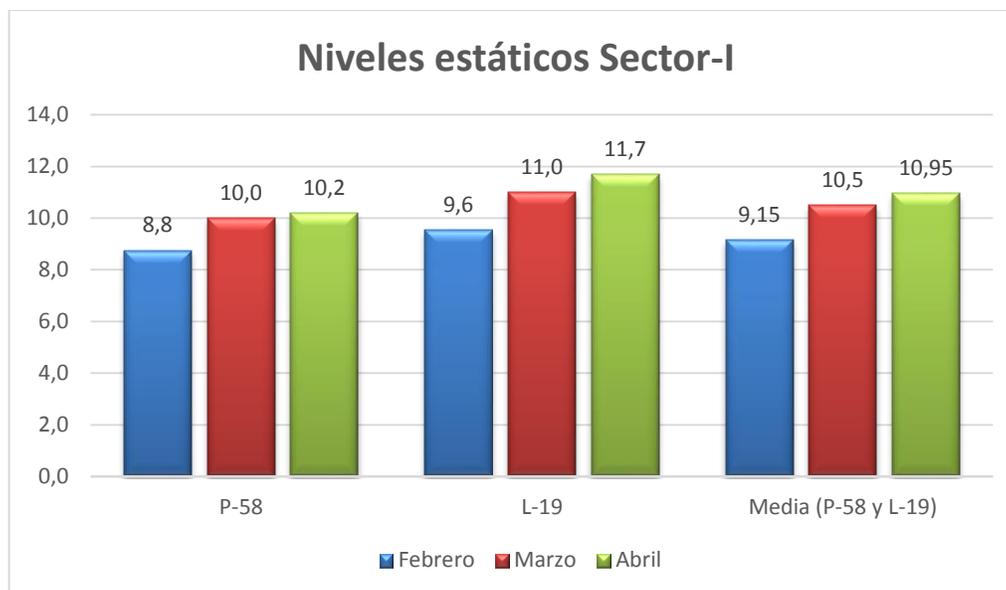


Figura 2.19. Valores de los niveles estáticos para el sector 1.

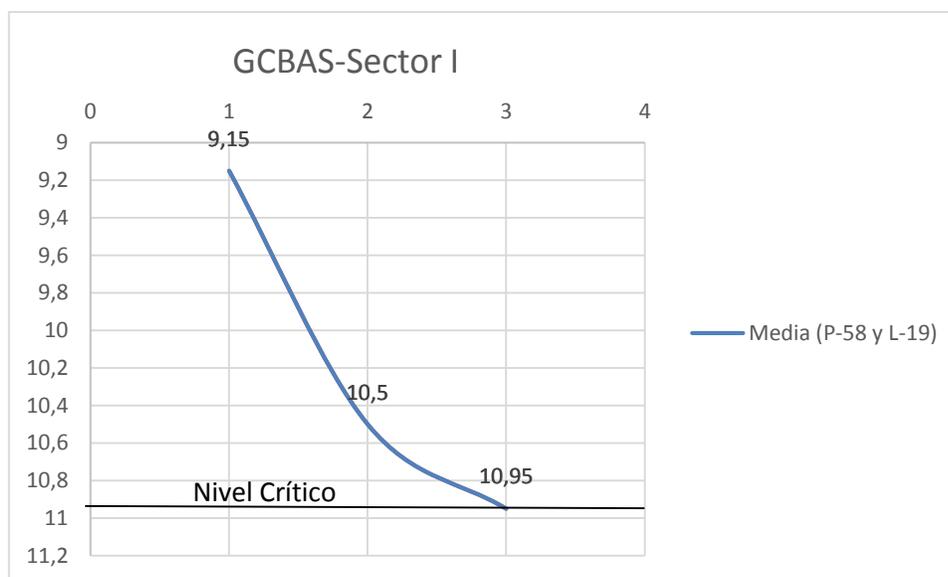


Figura 2.20. Gráfico de control de balance para el sector 1.

Una vez realizado el GCBAS se procedió a calcular todos los elementos de balance (Δz_h , Δh) y (ΔH) como indica la ecuación 1.4. La recarga neta ΔH se calculó para los ocho sectores presentes teniendo en cuenta los valores medios de los pozos que representan el comportamiento de la cuenca.

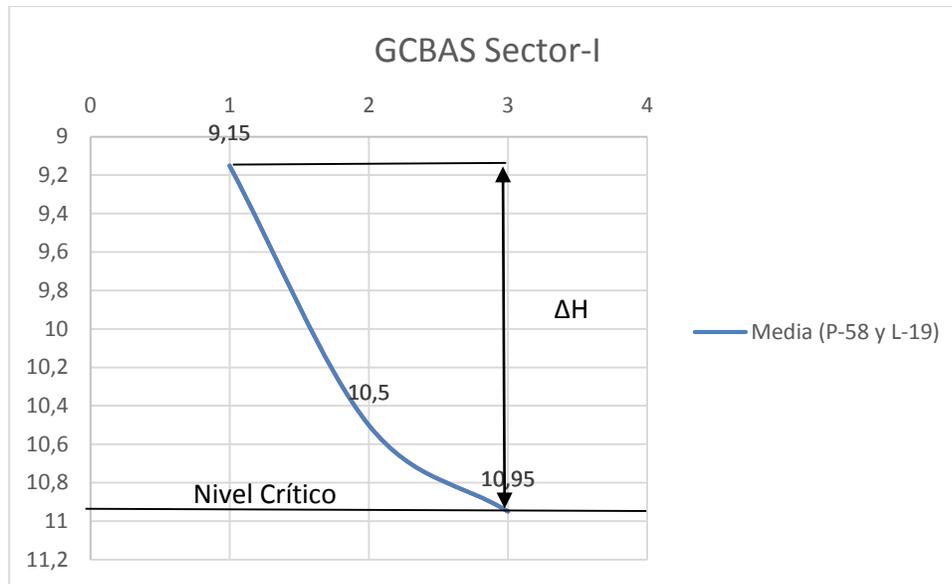


Figura 2.21. Gráfico de control de balance con la representación de los elementos de balance. Fuente Autor.

De la figura anterior se pudo obtener que en el sector 1 el comportamiento de las aguas subterráneas durante los meses de estudio tuvo una tendencia a disminuir por lo que para este caso se trata de una descarga.

Según la ecuación 1.4

$$\Delta H = \sum \Delta h + \Delta z_h$$

Donde:

ΔH = Nivel crítico - Mínimo nivel medido

$\Delta H = 10,95 - 9,15$

$\Delta H = 1,80 \text{ m}$

Una vez ya tenidos, Δh y definidos, ΔH calculado mediante el GCBAS, permitió calcular el volumen de agua disponible del sector hidrogeológico.

Posteriormente se calcularon estos parámetros para los distintos sectores hidrogeológicos en la cuenca teniendo en cuenta que son necesarios para el cálculo del volumen de agua subterránea en la cuenca (Anexo 10).

2.5.3 Cálculo del volumen disponible en la cuenca.

Para la obtención del volumen se tuvo en cuenta el porcentaje de explotación de las aguas subterráneas en la cuenca (λ), mediante un recorrido por el sectores hidrogeológicos teniendo un rango de valores de (0.75-0.85) en según el carácter de la explotación en el territorio.

Sector 1

La evaluación del porcentaje de explotación se llevó cabo tomando como base la explotación realizada en las diferentes zonas y los principales fines en sector 1 a través de los distintos viajes a la zona de estudio.

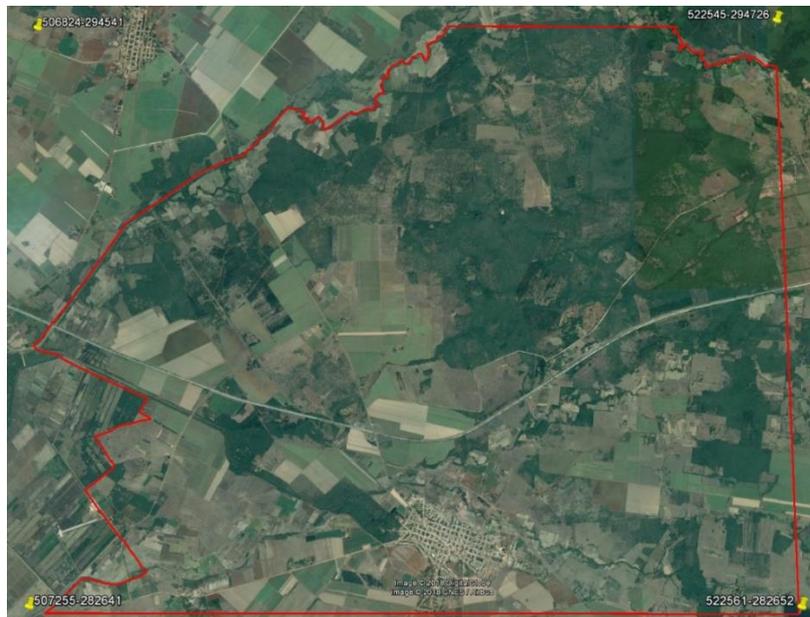


Figura 2.22. Representación espacial de la ubicación del sector 1 en la cuenca. Tomada desde Google Earth.

El grado de explotación de las aguas subterráneas en el sector es considerable ya que dentro de este sector encontramos el municipio de Aguada donde la actividad agraria demanda un importante volumen de agua subterránea anualmente, teniendo como principales cultivos la caña de azúcar, viandas y fundamentalmente arroz.

Se realizó de igual manera la estimación del grado de explotación de los restantes sectores obteniendo los siguientes resultados en la tabla y la representación espacial (Anexo 11).

Tabla 2.8. Valores del porcentaje de explotación de las aguas subterráneas y principales cultivos en los sectores hidrogeológicos.

No	Sectores hidrogeológicos	λ	Principales cultivos
1	Sector-I	0.8	Caña de azúcar, yuca y arroz
2	Sector-II	0.75	Caña de azúcar
3	Sector-III	0.83	Malanga, frijoles, papa y arroz
4	Sector-IV	0.79	Caña de azúcar
5	Sector-V	0.83	Caña de azúcar y arroz
6	Sector-VI	0.80	Caña de azúcar y arroz
7	Sector-VII	0.76	Caña de azúcar
8	Sector-VIII	0.82	Caña de azúcar y arroz

Para la obtención del volumen disponible en los sectores se aplicó la fórmula 1.8,

$$V = \mu * \Delta H * F * \lambda$$

La misma se aplicó para los distintos sectores y se obtuvo como resultado el volumen disponible (Vd) expresado en hm^3 como se muestra a continuación.

Tabla 2.9. Valores de los volúmenes disponibles de agua subterránea por sectores.

No	Sectores hidrogeológicos	Área (km^2)	μ	ΔH (m)	λ	Volumen disponible (hm^3)
1	Sector-I	150.2	0.080	1.8	0.80	17.30
2	Sector-II	166.4	0.050	0.6	0.75	3.74
3	Sector-III	125.5	0.120	1.4	0.83	17.50
4	Sector-IV	102.0	0.095	2.4	0.79	18.37
5	Sector-V	132.8	0.100	0.6	0.83	6.61
6	Sector-VI	110.0	0.055	0.44	0.80	2.13
7	Sector-VII	72.0	0.035	0.6	0.76	1.15
8	Sector-VIII	121.9	0.095	0.17	0.82	1.61
Total		980.8				68.42

Conclusión parcial:

Se identificaron los pozos de estudios y mediante la geología, hidrografía, el clima, se caracterizaron los sectores enmarcados en la cuenca obteniendo los niveles estáticos de los pozos lo que permitió a partir de una análisis estadístico la elaboración del GCBAS evaluando o determinando los parámetros de alimentación o recarga neta necesarios en la aplicación de la fórmula del volumen.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.

En este capítulo se muestran los resultados de la investigación referente al caso de estudio real facilitando a la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Cienfuegos los volúmenes por sectores y de la cuenca Cf1 Hanábana en general para el período de enero hasta abril.

3.1 Ubicación geográfica de la cuenca CF1 Hanábana.

La cuenca subterránea Cf1 Hanábana está ubicada en la provincia de Cienfuegos, Cuba. Limita al Norte y Oeste con la provincia Matanzas, al Este con la cuenca CF4 Cartagena y la cuenca CF3 Abreus y al Sureste con la cuenca CF2 Juraguá. Como se aprecia en la Figura 3.1.

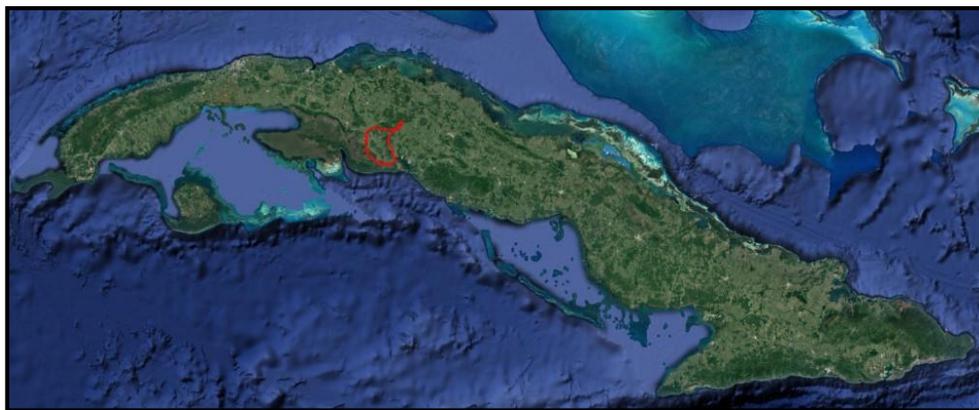


Figura 3.1. Representación espacial de la ubicación de la cuenca Cf1 Hanábana. Imagen satelital Google Earth 2018.

3.2 Sectorización hidrogeológica.

Las áreas o sectores se delimitaron de acuerdo con las características de los complejos geólogo-genético en el territorio. Se efectuaron ocho sectores buscando la mayor homogeneidad con respecto a las formaciones litológicas, edad y espesor de los estratos que conforman la zona geológica como se aprecia en la Figura 3.2.

Para la conformación de los ocho sectores se tuvo en cuenta que:

1- Tuviesen la misma representación de pozos de acuerdo con la zona dentro de la cuenca.

2- No abarcaran demasiado territorio, ni fueran muy numerosos para poder realizar las pruebas de campo con mayor sistematicidad.

3- Estuviesen dentro de la misma formación litológica.

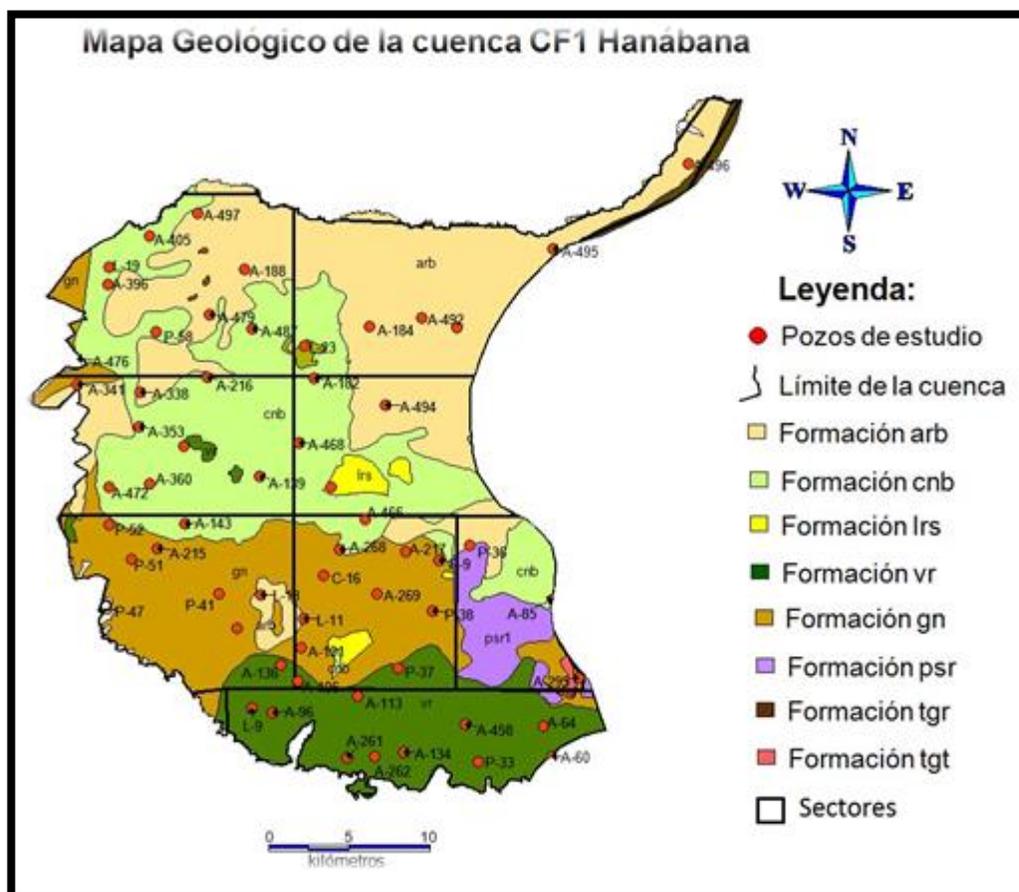


Figura 3.2. Mapa geológico de la cuenca Cf1 Hanábana con los sectores hidrogeológicos.

Como se aprecia en la figura anterior en cada sector hidrogeológico predomina un tipo de suelo de forma tal que se tenga en cuenta para la sectorización de la cuenca como se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla 3.1. Formaciones geológicas para los distintos sectores.

No	Sector Hidrogeológico	Formación geológica
1	Sect-I	ARABOS, Formación (arb)
2	Sect-II	ARABOS, Formación (arb)
No	Sector Hidrogeológico	Formación geológica

3	Sect-III	CANTABRIA, Formación (cnb)
4	Sect-IV	CANTABRIA, Formación (cnb)
5	Sect-V	GÜINES, Formación (gn)
6	Sect-VI	GÜINES, Formación (gn)
7	Sect-VII	PASO REAL, Formación (psr)
8	Sect-VIII	VILLARROJA, Formación (vr)

A partir del empleo de las herramientas que brinda el software MapInfo 10.5 se obtuvieron las áreas aproximadas de los sectores hidrogeológicos (ver tabla 3.), las cuales serán utilizadas para calcular el volumen disponible presente en la cuenca CF1 Hanábana mediante la distribución espacial de la cuenca como se muestra en la figura 3.3.

Tabla 3.2. Valores de las áreas pertenecientes a los sectores.

No	Sectores hidrogeológicos	Áreas (km ²)
1	Sect-I	150,2
2	Sect-II	166.4
3	Sect-III	125.5
4	Sect-IV	102.0
5	Sect-V	132.8
6	Sect-VI	110.0
7	Sect-VII	72.0
8	Sect-VIII	121.9

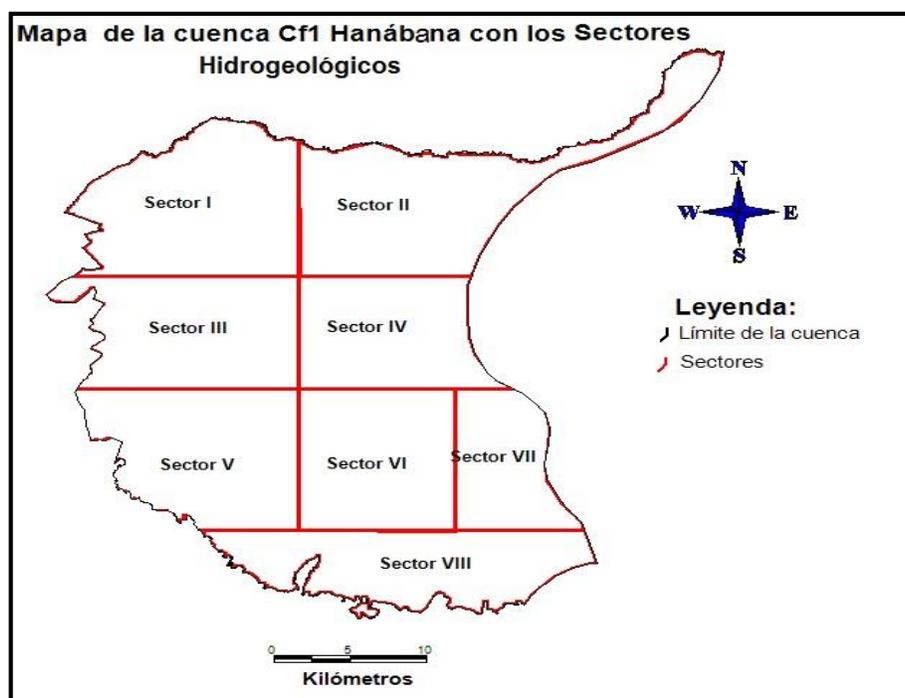


Figura 3.3. Sectores hidrogeológicos en la Cuenca Cf1 Hanábana. Fuente Autor.

3.2 Identificación de los pozos muestreados en la cuenca

En el caso de estudio se efectuaron muestreos a 55 pozos, a 19 de estos se le realizan los sondeos mensuales como se aprecia en la tabla 3.3, ya son considerados los que brindan el comportamiento general de la cuenca subterránea, y los 34 restantes se le realizan los sondeos semestralmente como se muestra en el Anexo 1.

Tabla 3.3. Identificación de los pozos de la Red Informativa Mensual.

Código del pozo	Municipio	Numeración	x	y	Cota	Profundidad Total
L-19	Aguada	Área #1	511023,3	289888,5	20,0	40,2
P-58	Aguada	Área #1	513994,5	285553,2	17,9	45,0
A-275A	Abreus	Área # 2	532750,8	285903,9	16,1	30,0
L-23	Aguada	Área # 2	523218,0	284632,0	38,0	5,0
A-353	Aguada	Área # 3	512909,2	279311,5	13,1	30,0
P-53	Aguada	Área # 3	515700,6	278035,7	17,8	38,0
A-468	Aguada	Área # 4	522887,1	278208,8	31,3	15,0

Tabla 3.3. Identificación de los pozos de la Red Informativa Mensual. (Continuación)

Código del pozo	Municipio	Numeración	x	y	Cota	Profundidad Total
P-42	Aguada	Área # 4	524888,4	275314,6	33,8	20,0
A-143	Aguada	Área # 5	515808,2	272855,3	15,5	30,0
L-13	Aguada	Área # 5	520510,1	268114,8	9,4	40,0
P-41	Aguada	Área # 5	517900,0	268200,0	6,5	50,0
P-51	Aguada	Área # 5	512475,1	270460,9	5,6	40,0
L-11	Aguada	Área # 6	523200,0	266550,0	10,8	30,0
P-37	Aguada	Área # 6	529086,8	263275,3	17,1	35,0
P-80	Abreus	Área # 7	539470	271660	39	3,70
A-275	Abreus	Área # 7	532550	2658800	53,8	3,40
A-64	Abreus	Área # 8	538206,7	259402,7	11,7	40,0
A-270	Abreus	Área # 8	524700	257000	6,3	3,68
L-9	Aguada	Área # 8	519981,0	260605,7	3,8	28,0

A continuación en la figura 3.4 se representó todos los pozos de estudios con su identificación que fueron incluidos en la investigación, los cuales se encuentran generalmente distribuidos en todos los sectores menos en los sectores 2,4 y 7 dada la problemática de la no existencia u obstrucción en otros casos. Se tomaron algunos pozos que estuviesen en los extremos o afuera de la cuenca para para evaluar el comportamiento de los niveles en esas zonas límites.

En el (Anexo 4) se muestran la identificación de cada sector y los pozos de estudios que lo conforman.

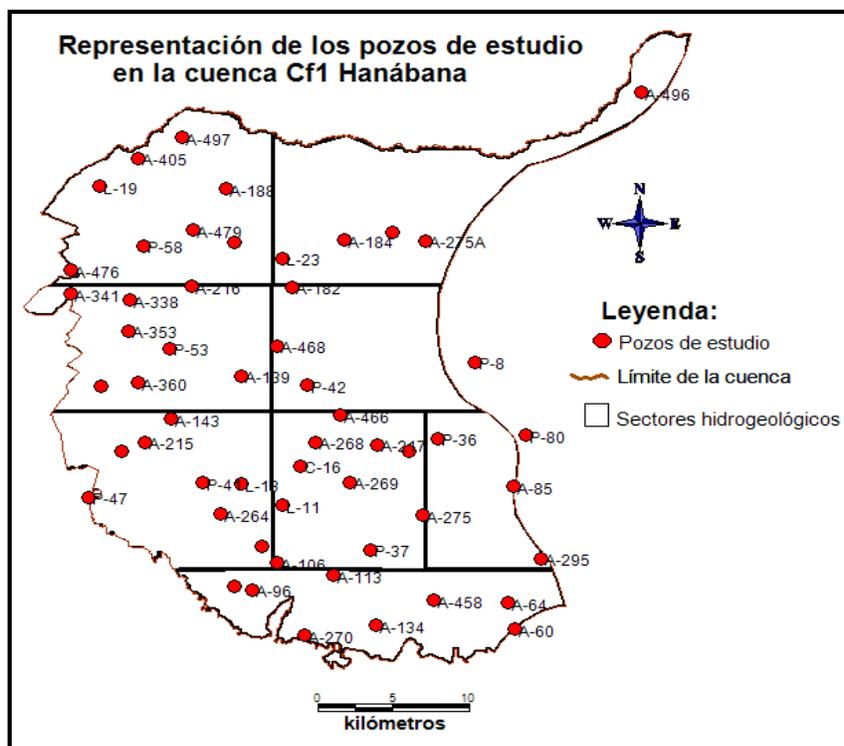


Figura 3.4. Mapa representativo de los pozos de estudio. Fuente Autor.

3.3 Evaluación del comportamiento hidráulico.

Profundidad al Nivel Estático.

De acuerdo con las evaluaciones de campo y la configuración de profundidad al nivel estático, se observa que en la cuenca los valores medios oscilan entre los 4m y 10m, estos valores se incrementan hacia las elevaciones que delimitan el acuífero llegando a alcanzar valores entre los 15 m y 28 m y hacia la Ciénaga de Zapata los niveles estáticos disminuyen tomando valores entre 1m y 3m de profundidad como se observa en la siguiente figura.

la profundidad es más inestable en los pozos A-188 y A-182 con 28 m de profundidad.

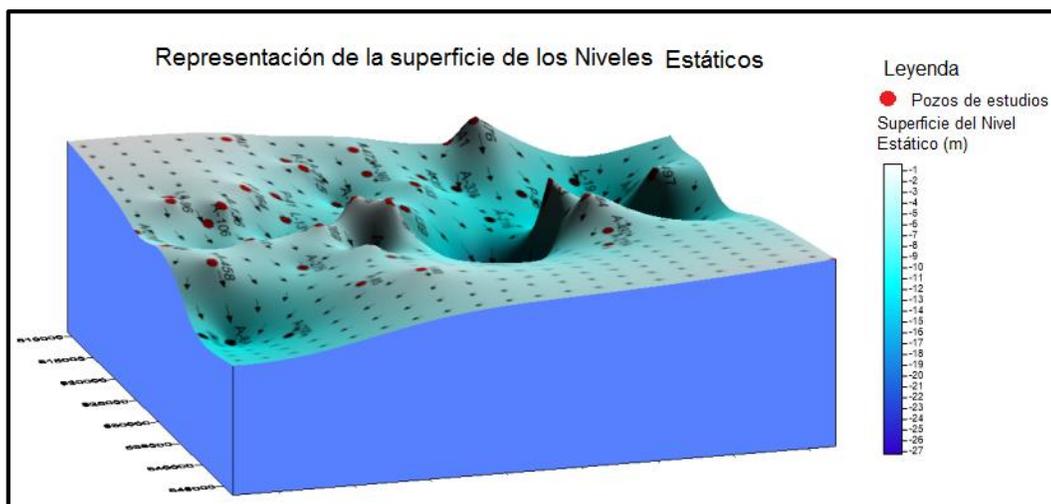


Figura 3.7. Representación de los niveles estáticos en una vista 3D con los pozos de estudios y la dirección del flujo. Fuente Autor.

En la anterior figura se representa de una forma espacial una combinación de capas en 3D de la cota topográfica y los niveles estáticos donde las mayores profundidades se encuentran en los pozos A-188 y A-182 pertenecientes a los sectores I y IV respectivamente viéndose con más claridad en la anterior figura.

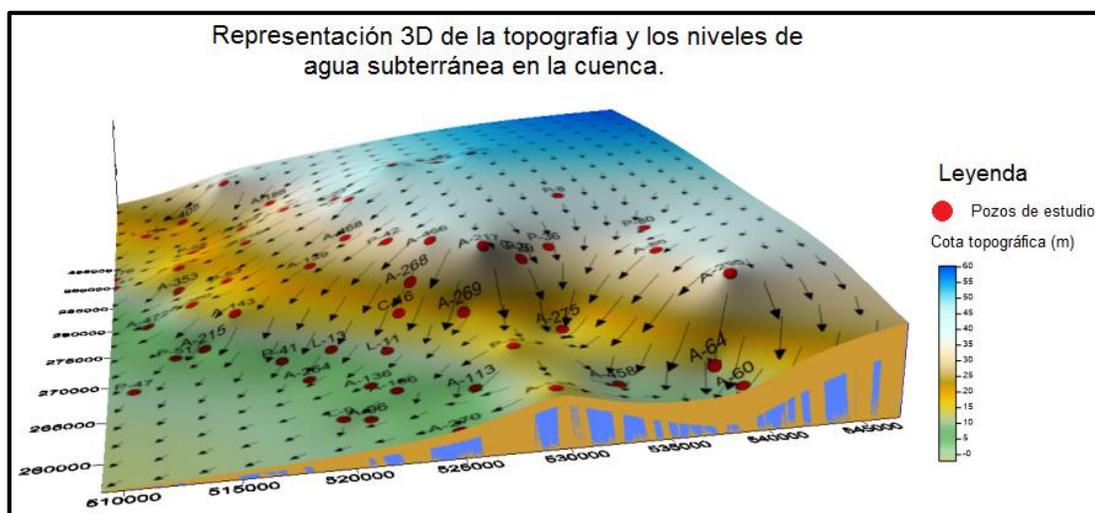


Figura 3.8. Representación de una simulación de un modelo conceptual donde la primera capa representa la superficie topográfica y la segunda capa la superficie piezométrica. Fuente Autor.

Además se representó los pozos de estudio y las hidroisohipsas, donde estas últimas mencionadas pueden aportar criterios para la toma de decisiones en períodos críticos y para definir aquellas zonas donde hay que realizar restricciones de explotación o cancelar pozos para preservar la fuente de un objetivo económico de interés para la provincia o la nación.

Evolución del Nivel Estático

De acuerdo con la configuración de evolución del nivel estático para el período de estudio enero-mayo del 2018, se observó que, de manera general, los niveles de agua subterránea no han sufrido variaciones significativas en su posición con respecto a los niveles arrojados por la cuenca a fines del 2017. Por el contrario se presentan valores positivos, indicando una recuperación del nivel de agua subterránea, presentando valores entre 1 y 3 m dada la influencia de las lluvias del mes de abril.

La evolución de los niveles estáticos con respecto a los anteriores años es positivos debido a la influencia de las lluvias a finales del 2017 provocando una buena recarga para la cuenca pero la tendencia de estos últimos meses fue descender.

3.4 Evaluación de los volúmenes aproximados de los recursos naturales.

Los recursos de explotación de las aguas subterráneas para el territorio según el estudio llevado a cabo alcanza un valor de 68.42 hm³ (Tabla 2.9).

Según los datos suministrados por el Departamento de Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos hacia abril del 2018 se contaba con 140 hm³ del recurso explotable y 62.93 hm³ del recurso disponible por lo que indica que en el estudio realizado se obtuvo 5.49 hm³ más que lo planteado por esta empresa.

Dentro del área estudiada la explotación más intensa brindada por los diferentes usuarios ocurre en los sectores I, III, V y VIII donde las aguas subterráneas se explotan para el riego de cítricos, viandas y fundamentalmente caña y arroz.

A pesar de esto el sector I, III y IV presentaron un potencial en cuanto a agua subterránea teniendo los valores más altos de la cuenca por lo contrario hacia los

sectores VI, VII y VIII el potencial subterráneo no alcanzó valores significativos lo que se recomienda tener presente estos valores a la hora de extraer agua en estas zonas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- 1- Se logró obtener el volumen disponible por sectores hidrogeológicos mediante la sectorización, lo que permitió a partir de estos resultados calcular el volumen disponible total de la cuenca subterránea para el periodo de estudio.
- 2- Se obtuvieron los niveles estáticos de los pozos pertenecientes a la zona de estudio posibilitando concluir que los pozos A-188 y A-182 situados en el municipio de Aguada de Pasajeros incluidos para su estudio dentro de la red informativa semestral fueron los de mayor profundidad del nivel estático, por lo que se recomienda su observación e incluirlos dentro de la red informativa mensual.
- 3- Al darle seguimiento al comportamiento de los niveles de la cuenca Cf1 Hanábana se podrá obtener una secuencia de las oscilaciones hiperanual de los niveles estáticos facilitando obtener un Nivel Crítico admisible para la cuenca y así evaluar cual sector está sobreexplotado o subexplotado.

Recomendaciones

- 1- Incluir más pozos de estudio en la cuenca Cf1 Hanábana para un tener un mejor conocimiento de la cuenca y del volumen de agua subterránea para un correcto manejo del recurso hídrico debido a que la cuenca cuenta con diferentes usuarios.
- 2- Efectuar un control más racional sobre el régimen de las aguas subterráneas, lo cual hace necesario continuar las observaciones sistemáticas en los pozos de la red establecida para estos fines.
- 3- Se recomienda el uso de la sectorización para el uso del balance del recurso hídrico subterráneo con los distintos usuarios a partir de la obtención de los volúmenes explotables en los diferentes sectores hidrogeológicos.
- 4- Realizar el trabajo para los distintos períodos principalmente en los períodos húmedos.

5-Se recomienda la reevaluación de los volúmenes de la cuenca debido a la incertidumbre de los valores del coeficiente de almacenamiento, transmisibilidad y difusividad hidráulica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (Julio) 2005. Cuba: Objetivos de Desarrollo del Milenio. Segundo Informe de Cuba.
- AGUA., P. D. F. E. M. D. Gestión del recurso hídrico subterráneo en Cuba. Hidrogeología-IV.20 al 24 de Septiembre de 2010 .Ciudad de la Habana, Cuba, 2010 Ciudad de la Habana, Cuba.
- ÁLVAREZ, D. Y. 2010. Empleo de los SIG en Cuba.
- ÁLVAREZ, M. G. 2005. Trabajo de Diploma.
- ANTONIO, C. D. A. J., LÓPEZ-GETA, J. M. F. A., GERARDO RAMOS GONZÁLEZ Y FERMÍN & GIL), V. 2009. *Las Aguas Subterráneas: Un recurso natural del subsuelo.*, Madrid, España, Instituto Geológico y Minero de España.
- ARCGIS. 2017. Software ArcGis. Available: <http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>.
- AROCHA 1980. Parámetros hidráulicos.
- AUTORES (GRUPO BASE DEL GW•MATE), A. T., (1)STEPHEN FOSTER, (2)KARIN KEMPER2 Y HÉCTOR GARDUÑO MARCELLA NANNI . (1)AUTOR LÍDER Y (2)AUTOR DE APOYO PRINCIPAL) 2002-2006. Requerimientos de Monitoreo del Agua Subterránea para manejar la respuesta de los acuíferos y las amenazas a la calidad del agua. *Gestión Sustentable del Agua Subterránea Conceptos y Herramientas*.
- BALEK, J. 1988. *Groundwater recharge concepts. En: Estimation of Natural Groundwater Recharge*, Boston: Ed. Reidel, NATO ASI Series.
- BATEMAN, A. 2007. HIDROLOGIA BASICA Y APLICADA. Available: UPC www.gits.ws
- BOZA, M. 2014. Extracciones, recursos y pronósticos. Especialista en cuencas Subterráneas en la EAH.
- CÁCERES, D. R. J. 2016. *Representación espacial para la gestión de la calidad del agua de pozos en el municipio de Rodas en la provincia de Cienfuegos.* . TRABAJO DE DIPLOMA, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- CALA, I. A. Q. M. A., ING. OSCAR 1993. *Informe sobre las investigaciones hidrogeológicas para la determinación del potencial hidráulico subterráneo en la cuenca Hanábana.*, Cienfuegos, Vento de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos Departamentos de Investigaciones
- CASTANY, G. 1967. *Traité pratique de eaux souterraines*, Dunod, Paris.
- CIENFUEGOS, E. El agua en la cuenca CF1 Hanábana. Características principales, calidad y disponibilidad. Cienfuegos, Cuba.
- CUJAE, C. D. A. 2012. Guía para el Manejo de Datos Espaciales en Proyectos Docentes de la Carrera de Ingeniería Hidráulica.

- CUSTODIO, E. L. M. R. S., J 1997. *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica.* , Madrid, España, Instituto Tecnológico Geominero de España.
- DUQUE, J. A. D. 2012. Hacia el uso sostenible del agua en Cuba. *Departamento de Geociencias, Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría”, CUJAE, Marianao, La Habana.*
- EAH 2017. Empresa de Aprovechamiento Hidráulico, Departamento Técnico. Cienfuegos.
- ESTUPIÑAN, L. 2016. Disponibilidad de agua en la provincia de Cienfuegos, Cienfuegos: Empresa de Aprovechamiento Hidráulico Especialista en Cuencas Superficiales.
- FRANCO, D. E. C. Y. P. T. D. L. C. D. I. H. D. P. 2001. *La Explotación del Agua Subterránea. Un Nuevo Enfoque. Primera Parte,* La Habana.
- GÁLVEZ, D. J. J. O. 2011. *Cartilla Técnica: Aguas Subterráneas- Acuíferos,* Jr. Puno 450 - Lima-Perú.
- GARCÍA., R. D., GONZÁLEZ, M. Á. & 2010. *Apuntes para un Libro de Texto de Teledetección y Sistemas de Información Geográfica epartamento de Topografía,* Santa Clara.
- JUAN GIL MONTES, G. Recursos Hidrogeológicos.
- LUNA, P. L. 2010. *Sistema de Información Geográfica para la ayuda de toma de decisiones en políticas sociales.* Maestra en Ciencias en Computación, CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.
- MESA, O. M. & BARRUECO, J. M. 2009. *Iniciativa Latinoamericana y Caribeña para el desarrollo sostenible . Indicadores de seguimiento* Ciudad de la Habana.
- MINISTERIO DE CIENCIA, T. Y. M. A. 2007. *La Estrategia Ambiental Nacional 2007-2010,* La Habana, Cuba.
- OTÁLVARO, M. V. V. *Métodos para determinar la recarga en acuíferos* Posgrado en Aprovechamiento de recursos Hidráulico, Universidad Nacional –Medellín.
- PALENTEOLOGÍA, I. D. G. Y. 1998.
- PECOSO, O. S. 2015. *Determinación de los recursos hídricos disponibles en la cuenca subterránea* TRABAJO DE DIPLOMA, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- PEÑALVER, I. I. P. 1999. *Manual Práctico de Campo Hidrogeológico,* La Habana, GEARH, Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos.
- PESA ENGINEERING, S. A. 2008. Instrumentos de medida y control para aguas subterráneas y superficiales. Para medición manual de niveles en pozos y aguas subterráneas. Available: www.pesa-gwe.es.
- QUINTANILLA, M. F. E. S. 2010. Programa de formación iberoamericano de formación en materia de aguas. Temática 3.1 Hidrogeología *Tema 6: Manejo de los recursos hídricos subterráneos.* AECID, Montevideo, Uruguay.

-
- SCANLON, B. R. H., P.G.; COOK 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, No. 10, pag. 18-39. .
- SCHNEEBELI, G. 1966. *Hydraulique souterraine*, Eyrolles, Paris.
- SILVIA ANGELONE, I. M. T. G. Y. M. C. C. 2006. *Permeabilidad de los suelos* Universidad Nacional de Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura.
- SUEIRO, M. C. M. 2018. *Elaboración de Mapas Temáticos Hidrogeológicos para gestionar el recurso hídrico en la cuenca subterránea Cfl Hanábana*. Trabajo de Diploma, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Facultad de Construcciones.
- TARBUK EDWARD, L. F. 1998. *Geode II: Geologic Explorations on disk - Tasa Graphics Arts Inc. And Prentice Hall*
- TÉCNICA, E. D. A. H. D. 2017. Balance de agua 2017. Provincia de Cienfuegos.
- UNESCO-WWAP 2012. Gestión del agua en un contexto de incertidumbre y riesgo. EXTRAÍDO DEL INFORME DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL DESARROLLO DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL MUNDO 4. *World Water Assessment Programme, WWAP*.
- VALDEZ, A. O. H. 2011. Recursos hidráulicos subterráneos: Observaciones sobre su evaluación y gestión en Cuba. 32(1), 3-12.
- YAGUE, J. L. F. Aguas subterráneas. *Hojas Divulgadoras No 1/92 HD*.

Bibliografía:

1. *Disponibilidad de agua y población* [Online]. Disponible en: http://aquabook.agua.gob.ar/1024_0 [Hora de consulta: 1:30 PM, Fecha: 18 de diciembre del 2017].
2. El agua en el mundo, reservas de agua dulce. pág.: 258-316.
3. Extracción de agua subterránea.
4. marzo, 2012. Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos
5. hídricos
6. CONAGUA (C. N. D. A), 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuernavaca. *Diario Oficial de la Federación*.
7. ABREU, I. R. G. 2000-2005. Métodos de Control y Pronóstico de las aguas subterráneas.
8. ANTONIO, C. D. A. J., LÓPEZ-GETA, J. M. F. A., GERARDO RAMOS GONZÁLEZ Y FERMÍN & GIL), V. 2009. *Las Aguas Subterráneas: Un recurso natural del subsuelo.*, Madrid, España, Instituto Geológico y Minero de
9. España.
10. ARZOLA, L. C. R. 2016. *Modelo matemático para la optimización del costo de bombeo de la explotación del agua subterránea*. Tesis para optar por el grado de Máster en Modelación Matemática Aplicada a la Ingeniería., Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría".
11. AUGE, M. 2006. Métodos y técnicas para el monitoreo de acuíferos.
12. AUGE, M. 2007. Agua fuente de Vida.
13. BARCO, C. A. D. Z. Y. J. J. O. 2014. *Determinación del almacenamiento de agua subterránea presente en los acuíferos de la cuenca del río Neusa, Cundinamarca mediante el análisis de información hidrológica e hidrológica*. Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Recursos Hídricos., UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA.
14. COLECTIVO DE AUTORES (ARMANDO O. HERNÁNDEZ VALDEZ, J. B. M. R., FÉLIX DILLA SALVADOR Y HAYDÉE LLANUSA RUIZ) 2001. *Modelación de Acuíferos*.

15. ESTUPIÑAN, I. E. C. 2007. *Simulación de acuíferos con el ejemplo de herramientas de los sistemas de información geográfica*. Tesis para optar por el título de Máster en Ing. Hidráulica, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Hecheverría" (CUJAE).
16. FUENTES, I. M. M. & BAUTA, I. A. C. 2003. Cálculo de los recursos de las aguas subterráneas por el método de balance en la zona BARIAY-GUABAJANEY, tramo II (GUABAJANEY). HOLGUÍN: EMPRESA APROVECHAMIENTO HIDRÁULICO
17. HOLGUÍN.
18. GANANCIAS, I. F. La Hidrogeología o Hidrología subterránea evalúa la presencia, disponibilidad y calidad del agua subterránea. *Hidrología y procesos hidrológicos*.
19. GARCÍA HERNÁNDEZ, J. M. 2007. Aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integrada de los recursos hídricos. Aproximación al caso cubano. *Revista Voluntad Hidráulica, Año XLV, No. 99*, p. 2-17.
20. HIDRÁULICA, H. R. P. C. Y. E. D. I. 2011. Creación de un Modelo Conceptual Hidrológico.
21. HÍDRICOS, U. P. M. D. E. D. L. R. 2006. El agua, una responsabilidad compartida. 2º Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo.: Disponible en: http://www.unesco.org/water/wwap/index_es.shtml Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo: Más allá de la escasez: Poder, pobreza y crisis mundial del agua. Informe sobre Desarrollo Humano 2006. 422 p., 2006.
22. IMFIA, U.-F.-. (agosto) 2008. Agua Subterránea. *Curso de Hidrología e Hidráulica Aplicadas. Módulo Hidrología*
23. MINISTRY OF SUPPLY AND SERVICES; USGOVERNMENT, S. F. V., 1980. 1993. Tipología de los usos de agua.
24. MUNDIAL, O. M. 1997. *¿Hay suficiente agua en el Mundo?*, Organización Meteorológica Mundial/ Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
25. PACHECO, G. M. Recursos Hídricos. *Ingeniería Sin Fronteras*.
26. PALMIRA), G. G. D. E. D. A. S. D. L. U. N. D. C. S. 2011. Creación de un modelo conceptual hidrogeológico

-
27. PNUMA. 2007. Programa del Agua Water Quality Outlook. PNUMA Sistema Mundial de Vigilancia del Medio Ambiente, Programa del Agua, Instituto Nacional de Investigación sobre el Agua.
 28. RODRÍGUEZ, G. B. 2012. La disponibilidad de agua en el Caribe. Apuntes esenciales de su situación ambiental. *Revista Cubana de Geografía*, pág. 1-10
 29. ROMAN, F. J. S. S. (septiembre) 2014. Conceptos Fundamentales de Hidrogeología. Clasificación de las formaciones geológicas según su comportamiento hidrológico. *Dpto. Geología- Universidad. Salamanca. España*, Pág.(11).
 30. SOLANO, D. F. J. M. 2002. *Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica a la gestión técnica de redes de distribución de agua potable*. TESIS DOCTORAL, Universidad Politécnica de Valencia.
 31. SUÁREZ, E. L. 2010. *Acuíferos semiconfinados y su modelación: Aplicaciones al acuífero de la zona metropolitana de la ciudad de México*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
 32. UNESCO-WWAP. 2003. Agua para todos, agua para la vida. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. *Word Water* [Online].
 33. WERNER, L. 1996. *La Introducción a la Hidrogeología*

ANEXOS

Anexo1. Tabla con los pozos de estudio identificados en el trabajo.

No	Código del pozo	Municipio	x	y
1	A-188	Aguada	519464,1	289723,6
2	A-405	Aguada	513573,5	291948,1
3	A-476	Aguada	509061,3	283778,0
4	A-479	Aguada	517273,2	286700,7
5	A-487	Aguada	519969,6	285798,0
6	A-497	Aguada	516555,5	293472,3
7	L-19	Aguada	511023,3	289888,5
8	P-58	Aguada	513994,5	285553,2
9	A-184	Aguada	527300,0	285950,0
10	A-275A	Abreus	532750,8	285903,9
11	A-492	Aguada	530546,8	286534,1
12	A-496	Aguada	547107,3	296779,6
13	L-23	Aguada	523218,0	284632,0
14	A-139	Aguada	520433,6	276035,0
15	A-216	Aguada	517179,9	282578,3
16	A-338	Aguada	512998,1	281569,8
17	A-341	Aguada	509074,5	282044,1
18	A-353	Aguada	512909,2	279311,5
19	A-360	Aguada	513550,0	275500,0
20	A-472	Aguada	511077,7	275307,6
21	P-53	Aguada	515700,6	278035,7
22	A-182	Aguada	523828,1	282511,7
23	A-468	Aguada	522887,1	278208,8
24	P-8	Abreus	536015,4	277042,1
25	P-42	Aguada	524888,4	275314,6
26	A-106	Abreus	522869,9	262322,4
27	A-136	Aguada	521814,2	263509,9
28	A-143	Aguada	515808,2	272855,3
29	A-215	Aguada	514037,5	271172,1
30	A-264	Abreus	519067,8	265881,6
31	L-13	Aguada	520510,1	268114,8
32	P-41	Aguada	517900,0	268200,0
33	P-47	Aguada	510328,6	267150,1
34	P-51	Aguada	512475,1	270460,9
35	A-217	Abreus	529565,1	270994,0
36	A-268	Aguada	525406,3	271156,0
37	A-466	Aguada	527021,4	273160,0

Anexo 1. Tabla con los pozos de estudio identificados en el trabajo. (Continuación)

No	Código del pozo	Municipio	x	y
38	A-269	Aguada	527748,6	268221,5
39	C-16	Aguada	524408,8	269406,0
40	C-29	Abreus	531662,3	270476,0
41	L-11	Aguada	523200,0	266550,0
42	P-9	Abreus	531662,3	270476,0
43	P-37	Aguada	529086,8	263275,3
44	A-85	Abreus	538600	267900
45	A-295	Abreus	540402,0	262632,8
46	A-275	Abreus	532550	265800
47	P-36	Abreus	533561,8	271427,7
48	P-80	Abreus	539470	271660
49	A-60	Abreus	538735,8	257460,1
50	A-64	Abreus	538206,7	259402,7
51	A-96	Abreus	521240,0	260352,6
52	A-113	Abreus	526600,0	261400,0
53	A-134	Abreus	529454,8	257720,7
54	A-270	Abreus	524700	257000
55	A-458	Abreus	533315,7	259595,6
56	L-9	Aguada	519981,0	260605,7

Anexo 2: Identificación de los de los pozos de la Red Informativa Mensual.

Código del pozo	Municipio	Numeración	x	y	Cota	Profundidad Total
L-19	Aguada	Área #1	511023,3	289888,5	20,0	40,2
P-58	Aguada	Área #1	513994,5	285553,2	17,9	45,0
A-275A	Abreus	Área # 2	532750,8	285903,9	16,1	30,0
L-23	Aguada	Área # 2	523218,0	284632,0	38,0	5,0
A-353	Aguada	Área # 3	512909,2	279311,5	13,1	30,0
P-53	Aguada	Área # 3	515700,6	278035,7	17,8	38,0
A-468	Aguada	Área # 4	522887,1	278208,8	31,3	15,0
P-42	Aguada	Área # 4	524888,4	275314,6	33,8	20,0
A-143	Aguada	Área # 5	515808,2	272855,3	15,5	30,0
L-13	Aguada	Área # 5	520510,1	268114,8	9,4	40,0
P-41	Aguada	Área # 5	517900,0	268200,0	6,5	50,0
P-51	Aguada	Área # 5	512475,1	270460,9	5,6	40,0
L-11	Aguada	Área # 6	523200,0	266550,0	10,8	30,0
P-37	Aguada	Área # 6	529086,8	263275,3	17,1	35,0
P-80	Abreus	Área # 7	539470	271660	39	3,70

Anexo 2: Identificación de los de los pozos de la Red Informativa Mensual.
(Continuación).

Código del pozo	Municipio	Numeración	x	y	Cota	Profundidad Total
A-85	Abreus	Área # 7	538600	267900	37	3,25
A-64	Abreus	Área # 8	538206,7	259402,7	11,7	40,0
A-270	Abreus	Área # 8	524700	257000	6,3	3,68
L-9	Aguada	Área # 8	519981,0	260605,7	3,8	28,0

Anexo 3: Identificación de los de los pozos de la Red Informativa Semestral.

Código del pozo	Municipio	Numeración	x	y	Cota	Profundidad Total
A-188	Aguada	Área #1	519464,1	289723,6	31,3	40,0
A-405	Aguada	Área #1	513573,5	291948,1	21,4	18,0
A-476	Aguada	Área #1	509061,3	283778,0	11,4	19,0
A-479	Aguada	Área #1	517273,2	286700,7	25,2	22,0
A-487	Aguada	Área #1	519969,6	285798,0	34,0	23,0
A-497	Aguada	Área #1	516555,5	293472,3	37,6	32,0
A-184	Aguada	Área # 2	527300,0	285950,0	50,6	18,0
A-492	Aguada	Área # 2	530546,8	286534,1	49,3	17,0
A-496	Aguada	Área # 2	547107,3	296779,6	61,3	10,0
A-139	Aguada	Área # 3	520433,6	276035,0	25,2	30,0
A-216	Aguada	Área # 3	517179,9	282578,3	25,4	25,4
A-338	Aguada	Área # 3	512998,1	281569,8	19,1	35,0
A-341	Aguada	Área # 3	509074,5	282044,1	11,2	30,0
A-360	Aguada	Área # 3	513550,0	275500,0	14,7	23,0
A-472	Aguada	Área # 3	511077,7	275307,6	7,4	20,0
A-182	Aguada	Área # 4	523828,1	282511,7	41,1	14,0
P-8	Abreus	Área # 4	536015,4	277042,1	45,5	41,0
A-106	Abreus	Área # 5	522869,9	262322,4	7,3	20,0
A-136	Aguada	Área # 5	521814,2	263509,9	6,5	25,0
A-215	Aguada	Área # 5	514037,5	271172,1	5,8	30,0
A-264	Abreus	Área # 5	519067,8	265881,6	4,5	30,0
P-47	Aguada	Área # 5	510328,6	267150,1	2,3	20,0
P-51	Aguada	Área # 5	512475,1	270460,9	5,6	40,0
A-217	Abreus	Área # 6	529565,1	270994,0	38,0	20,0
A-268	Aguada	Área # 6	525406,3	271156,0	25,3	25,0
A-466	Aguada	Área # 6	527021,4	273160,0	36,9	9,0
A-269	Aguada	Área # 6	527748,6	268221,5	18,2	30,0
C-16	Aguada	Área # 6	524408,8	269406,0	17,7	25,0
C-29	Abreus	Área # 6	531662,3	270476,0	32,1	16,0
P-9	Abreus	Área # 6	531662,3	270476,0	33,5	32,0

Anexo 3: Identificación de los de los pozos de la Red Informativa Semestral.
(Continuación)

Código del pozo	Municipio	Numeración	x	y	Cota	Profundidad Total
A-295	Abreus	Área # 7	540402,0	262632,8	37,5	15,0
A-275	Abreus	Área # 7	532550,0	265800,0	53,8	3,40
P-36	Abreus	Área # 7	533561,8	271427,7	34,5	40,0
A-60	Abreus	Área # 8	538735,8	257460,1	10,8	30,0
A-96	Abreus	Área # 8	521240,0	260352,6	3,2	20,0
A-113	Abreus	Área # 8	526600,0	261400,0	7,5	15,0
A-134	Abreus	Área # 8	529454,8	257720,7	15,4	24,0
A-458	Abreus	Área # 8	533315,7	259595,6	9,4	14,0

Anexo 4: Identificación de los pozos pertenecientes a los sectores hidrogeológicos.

Tabla 4.1. Pozos pertenecientes al sector 1

Código del pozo	x	y	Cota	Profundidad Total	Nivel Estático
A-188	519464,1	289723,6	31,3	40,0	28.0
A-405	513573,5	291948,1	21,4	18,0	12.6
A-476	509061,3	283778,0	11,4	19,0	1.4
A-479	517273,2	286700,7	25,2	22,0	13.2
A-487	519969,6	285798,0	34,0	23,0	11.2
A-497	516555,5	293472,3	37,6	32,0	5.7
L-19	511023,3	289888,5	0,0	40,2	10.8
P-58	513994,5	285553,2	17,9	45,0	9.7

Tabla 4.2. Pozos pertenecientes al sector 2.

Código del pozo	x	y	Cota	Profundidad Total	Nivel Estático
A-184	527300,0	285950,0	50,6	18,0	1.5
A-275A	532750,8	285903,9	16,1	30,0	5.7
A-492	530546,8	286534,1	49,3	17,0	5.3
A-496	546550	294550	61	10,0	1.0
L-23	523218,6	284632,3	38,0	5,0	1.2

Tabla 4.3. Pozos pertenecientes al sector 3.

Código del pozo	x	y	Cota	Profundidad Total	Nivel Estático
A-139	520433,6	276035,0	25,2	30,0	5.9
A-216	517179,9	282578,3	25,4	25,4	11.0
A-338	512998,1	281569,8	19,1	35,0	9.3
A-341	509074,5	282044,1	11,2	30,0	5.02
A-353	512909,2	279311,5	13,1	30,0	7.1
A-360	513550,0	275500,0	14,7	23,0	5.55
A-472	511077,7	275307,6	7,4	20,0	3.5
P-53	515700,6	278035,7	17,8	38,0	5.8

Tabla 4.4. Pozos pertenecientes al sector 4.

Código del pozo	x	y	Cota	Profundidad Total	Nivel Estático
A-182	523828,1	282511,7	41,1	40,0	28
A-468	522887,1	278208,8	31,3	15,0	13.3
P-8	536015,446	277042,1	45,5	41,0	5
P-42	524888,4	275314,6	33,8	20,0	11.86

Tabla 4.5. Pozos pertenecientes al sector 5.

Código del pozo	x	y	Cota	Profundidad Total	Nivel Estático
A-106	522869,9	262322,4	7,3	20,0	4.78
A-136	521814,2	263509,9	6,5	25,0	2.6
A-143	515808,2	272855,3	15,5	30,0	8.6
A-215	514037,5	271172,1	5,8	25,0	3.32
A-264	519067,8	265881,6	4,5	30,0	2.3
L-13	520510,1	268114,8	9,4	40,0	6.63
P-41	517900,0	268200,0	6,5	50,0	4.81
P-47	510328,6	267150,1	2,3	20,0	1.1
P-51	512475,1	270460,9	5,6	40,0	3.68

Tabla 4.6. Pozos pertenecientes al sector 6.

Código del pozo	x	y	Cota	Profundidad Total	Nivel Estático
A-217	529565,1	270994,0	38,0	20,0	8.9
A-268	525406,3	271156,0	25,3	25,0	0.47
A-466	527021,4	273160,0	36,9	9,0	0.2
A-269	527748,6	268221,5	18,2	30,0	2.44
C-16	524408,8	269406,0	17,7	25,0	8.7
C-29	531662,3	270476,0	32,1	16,0	3.3
L-11	523200,0	266550,0	10,8	30,0	8.38
P-9	531662,3	270476,0	33,5	32,0	1.3
P-37	529086,8	263275,3	17,1	35,0	3.02

Tabla 4.7. Pozos pertenecientes al sector 7.

Código del pozo	x	y	Cota	Profundidad Total	Nivel Estático
A-85	538600	267900	37	3,25	4.05
A-295	540402,0	262632,8	37,5	15,0	9.9
A-275	532550	265800	53,8	3,40	5.85
P-36	533561,8	271427,7	34,5	40,0	4.58
P-80	539470	271660	39	3,70	2.53

Tabla 4.8. Pozos pertenecientes al sector 8

Código del pozo	x	y	Cota	Profundidad Total	Nivel Estático
A-60	538735,8	257460,1	10,8	30,0	10
A-64	538206,7	259402,7	11,7	40,0	12.1
A-96	521240,0	260352,6	3,2	20,0	1.82
A-113	526600,0	261400,0	7,5	15,0	8
A-134	529454,8	257720,7	15,4	24,0	2.8
A-270	524700	257000	6,3	3,68	3.8
A-458	533315,7	259595,6	9,4	14,0	3
L-9	519981,0	260605,7	3,8	28,0	2.6

Anexo 5: Identificación de los pluviómetros que influyen en la cuenca Cf1 Hanábana.

N control	CE	CN	enero	febrero	marzo	abril	suma
8	515239,0	282863,9	35,2	22,9	32,6	99,6	190,3
19	524573,1	275669,4	49,9	18,0	39,0	217,7	324,6
20	522190,7	265771,7	60,4	0,0	20,0	140,4	220,8
32	538523,3	291129,3	60,0	37,0	35,0	115,0	247,0
35	537225,2	260045,8	60,8	27,3	36,2	85,3	209,6
414	522702,9	291835,5	42,6	14,5	65,9	206,3	329,3
517	527732,1	286749,8	57,0	42,7	55,0	173,8	328,5
551	536927,8	275504,7	65,0	27,0	46,0	54,0	192,0
555	510251,5	289965,9	40,9	19,7	43,0	228,0	331,6
562	532648,1	267042,6	53,5	17,9	13,4	106,9	191,7
925	511771,8	270023,4	53,0	9,0	21,0	177,6	260,6
959	547958,4	300569,9	73,6	16,0	47,1	223,7	360,4
960	545175,7	258073,2	52,5	2,5	34,0	84,2	173,2

Anexo 6. Cálculo de la lluvia media.

Tabla 6.1. Cálculos de la lluvia media por sectores y de la cuenca para el período de enero hasta abril.

Sector	Valor medio	Área (km ²)	Producto	lluvia media (mm)
1	190,30	50,67	9642,50	281,79
	207,40	1,70	352,58	
	328,50	3,08	1011,78	
	329,30	44,23	14564,94	
	331,60	50,52	16752,43	
2	247,00	31,94	7889,18	316,91
	328,50	91,18	29952,63	
	329,30	22,41	7379,61	
	360,00	20,87	7513,20	
3	190,30	24,94	4746,08	233,42
	207,40	64,01	13275,67	
	260,60	9,25	2410,55	
	324,60	27,30	8861,58	
4	192,00	20,60	3955,20	298,49
	324,60	63,75	20693,25	
	328,50	17,65	5798,03	

5	220,80	56,30	12431,04	247,76
	260,60	68,14	17757,28	
	324,60	8,36	2713,66	
6	191,70	46,60	8933,22	227,64
	192,00	1,14	218,88	
	220,80	41,63	9191,90	
	324,60	20,63	6696,50	
7	191,70	38,90	7457,13	196,49
	192,00	14,90	2860,80	
	209,60	18,27	3829,39	
8	191,70	5,63	1079,27	212,86
	209,60	70,40	14755,84	
	220,80	45,80	10112,64	
Total		980,8	252836,77	257,79

Anexo 7. Representación de la lluvia registrada en la cuenca a partir de las isoyetas de cada mes incluido en el estudio.

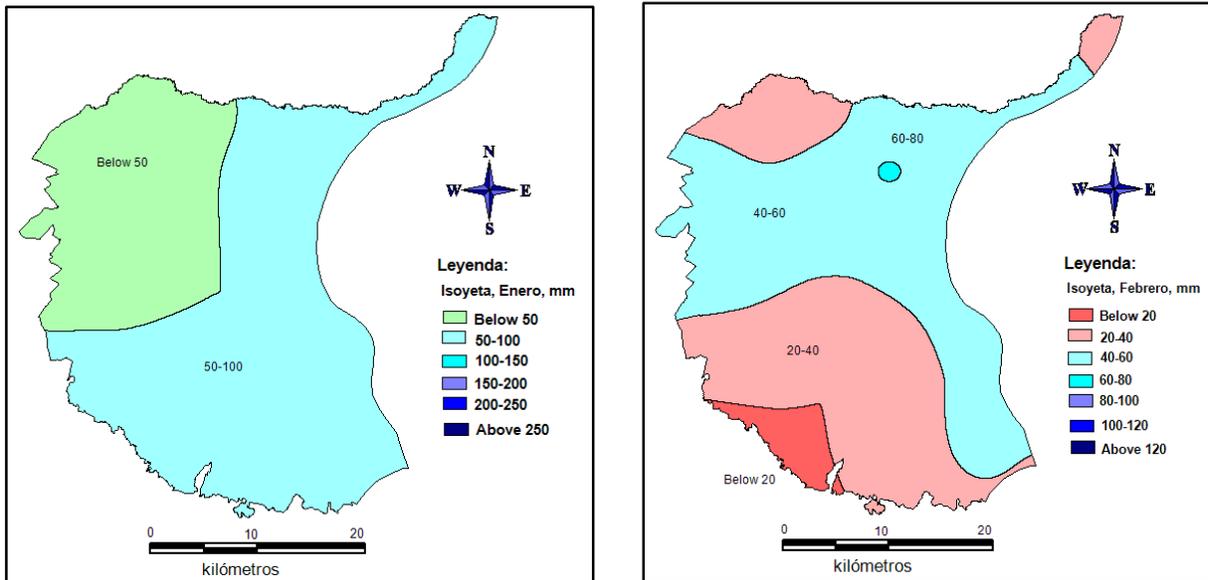


Figura 7.1 Isoyetas de la cuenca en los meses de enero y febrero.

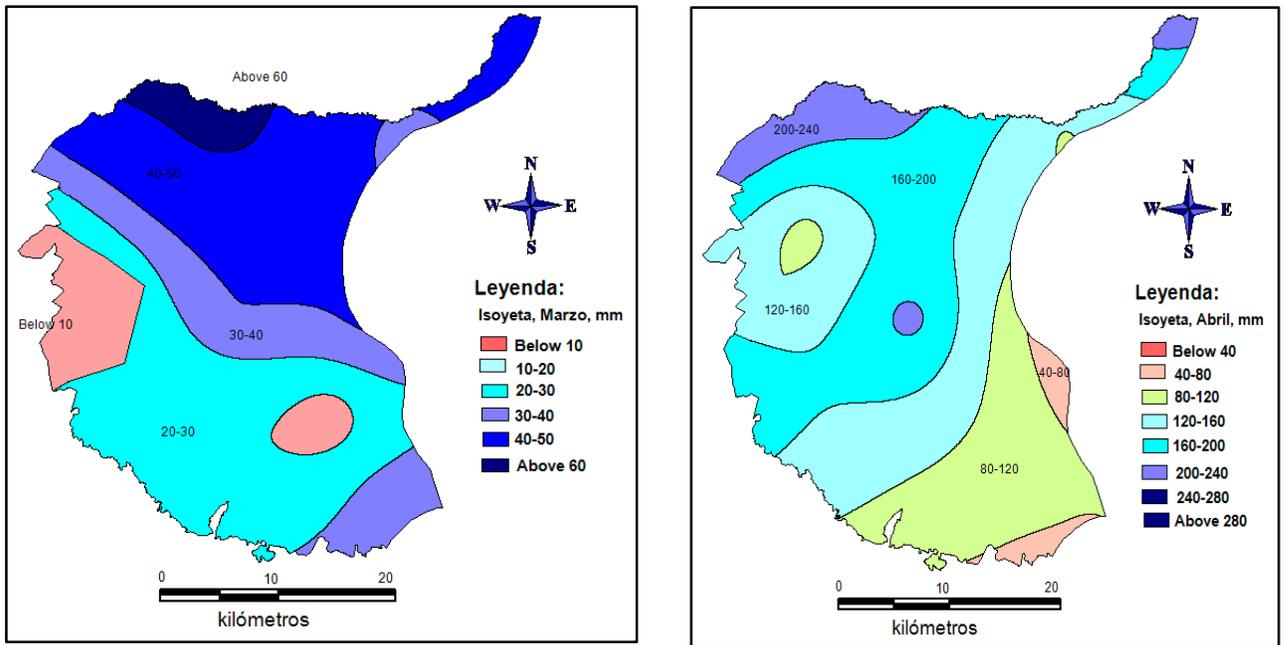


Figura 7.2 Isoyetas de la cuenca en los meses de marzo y abril.

Anexo 8. Correlación establecida entre los pozos escogidos por cada sector.

Sector 2

Pozo: A-275A Pozo: L-23

Niveles estáticos (m)	
5,3	1,2
5,9	1,4
5,8	1,0
Coef de correlación	0,23096898

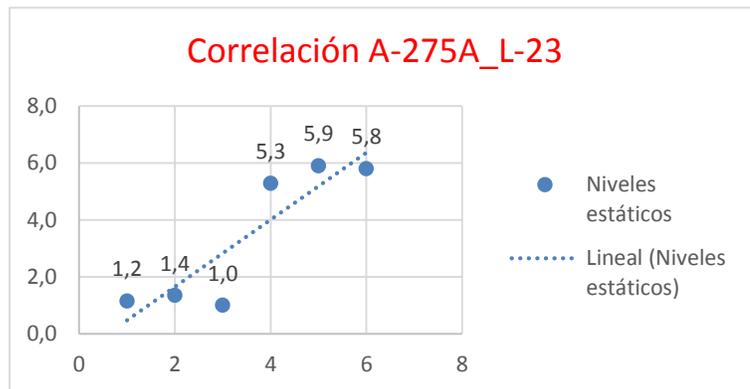


Figura 3.7 Representación de una correlación lineal entre los pozos A-275A y L-23, pertenecientes al sector 1. Fuente Autor.

Sector 3

Pozo: A-353 Pozo: P-53

Niveles estáticos (m)	
5,9	5,0
6,4	6
7,1	6,4

Coef de correlación 0,94325597

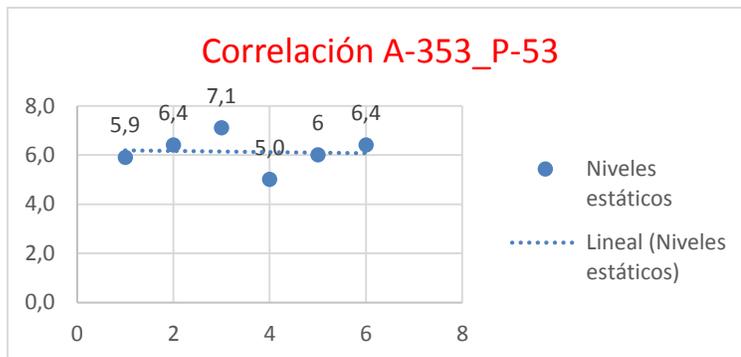


Figura 3.8. Representación de una correlación lineal entre los pozos A-353 y P-53, pertenecientes al sector 3. Fuente Autor.

Sector 4

Pozo: A-468 Pozo: P-42

Niveles estáticos (m)	
10,9	8,0
11,4	10,4
13,3	11,5

Coef de correlación 0,85970664

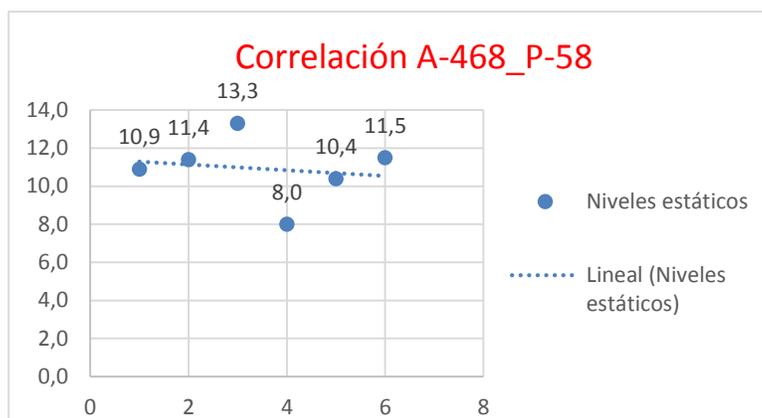


Figura 3.8. Representación de una correlación lineal entre los pozos A-468 y P-5, pertenecientes al sector 4. Fuente Autor.

Sector 5

Pozo: L-13 Pozo: P-41

Niveles estáticos (m)	
4,51	4,51
7,85	5,11
7,55	4,8

Coef de correlación 0,89535155

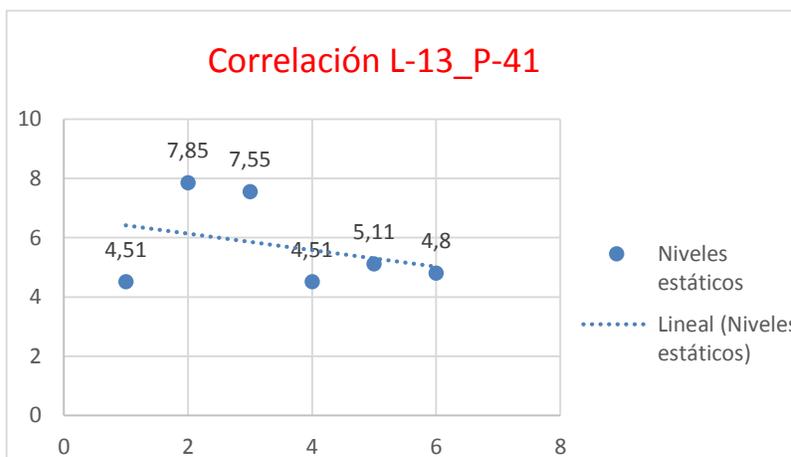


Figura 3.9. Representación de una correlación lineal entre los pozos A-468 y P-5, pertenecientes al sector 5. Fuente Autor.

Sector 6

Pozo: L-11 Pozo: P-37

Niveles estáticos (m)	
8,09	2,4
8,61	3,84
8,45	2,82

Coef de correlación 0,90305308

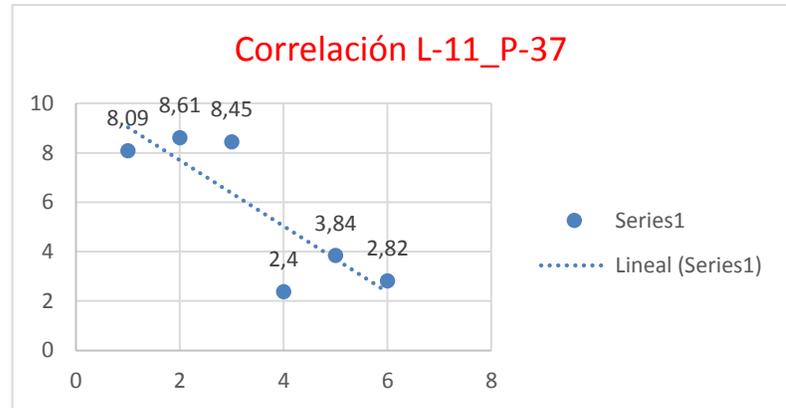


Figura 3.10. Representación de una correlación lineal entre los pozos L-11 y P-37, pertenecientes al sector 6. Fuente Autor.

Sector 7

Pozo: A-275 Pozo: P-80

Niveles estáticos (m)	
5,28	2,2
5,9	2,8
5,8	2,25

Coef de correlación 0,68130547

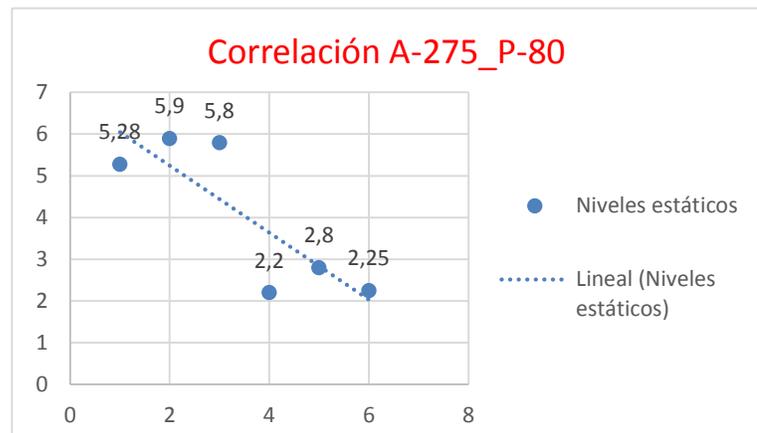


Figura 3.11. Representación de una correlación lineal entre los pozos A-275 y P-80, pertenecientes al sector 7. Fuente Autor.

Sector 8

Pozo: A-64 Pozo: A-270

Niveles estáticos (m)	
11,95	3,87
12,1	3,89
12,2	3,72

Coef de correlación 0,74

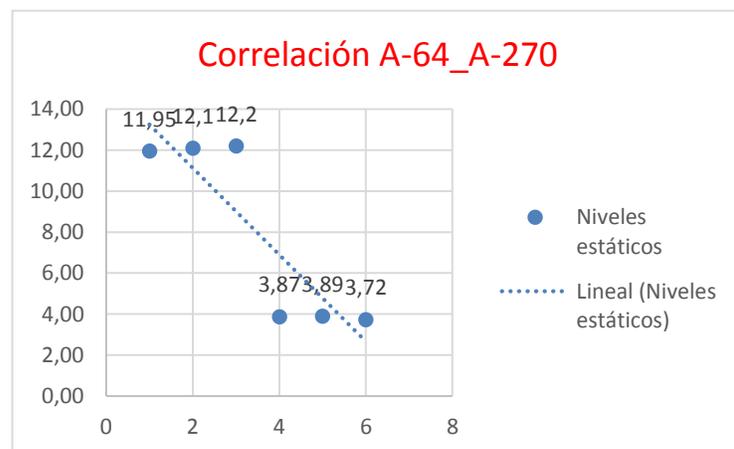


Figura 3.11. Representación de una correlación lineal entre los pozos A-64 y A-270, pertenecientes al sector 8. Fuente Autor.

Pozo: A-270 Pozo: L-9

Niveles estáticos (m)	
3,87	2,79
3,89	2,66
3,72	2,36

Coef de correlación 0,91830388

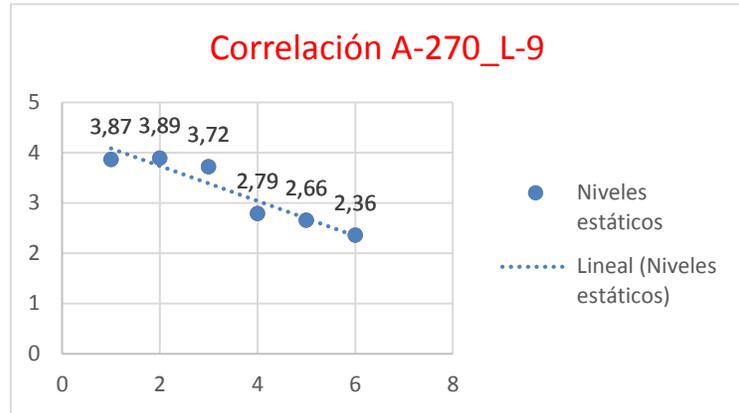


Figura 3.14: Representación de una correlación lineal entre los pozos A-270 y L-9, pertenecientes al sector 8. Fuente Autor.

Anexo 8. Correlación establecida Pozo-Pluviómetro.

Sector 2

Pozo correlacionado	Nivel(m) febrero	Nivel(m) marzo	Nivel(m) abril	Coeficiente de correlación	
	Lluvia(mm) febrero	Lluvia(mm) marzo	Lluvia(mm) abril	P-58	L-19
A-275	5,3	5,9	5,8		
L-23	1,2	1,4	1,0		
Lec-32	37,0	35,0	115,0	0,34	0,83
Lec-414	14,5	65,9	206,3	0,59	0,65
Lec-517	42,7	55,0	173,8	0,44	0,77
Lec-959	16,0	47,1	223,7	0,49	0,73

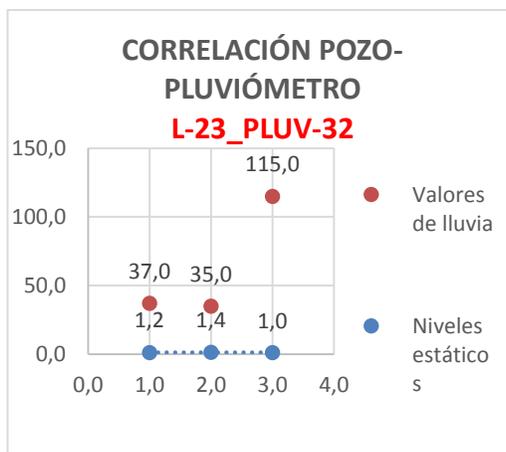
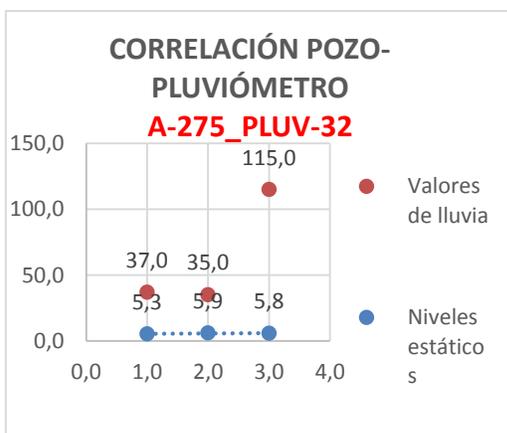


Figura 8.1. Representación de una correlación lineal de los pozos A-275 y L-23 con pluv-32.

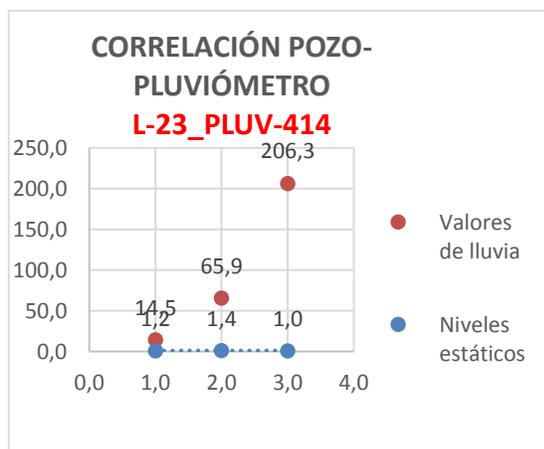
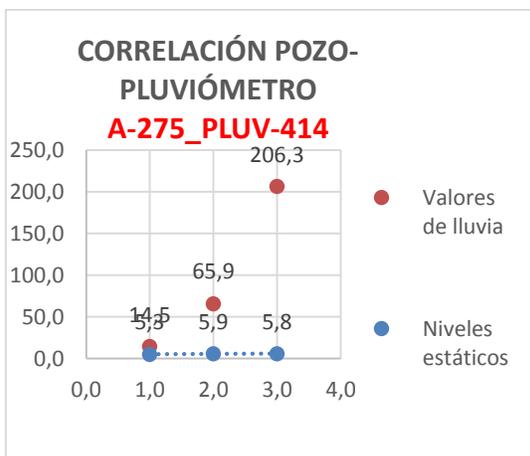


Figura 8.2. Representación de una correlación lineal de los pozos A-275 y L-23 con pluv-414.

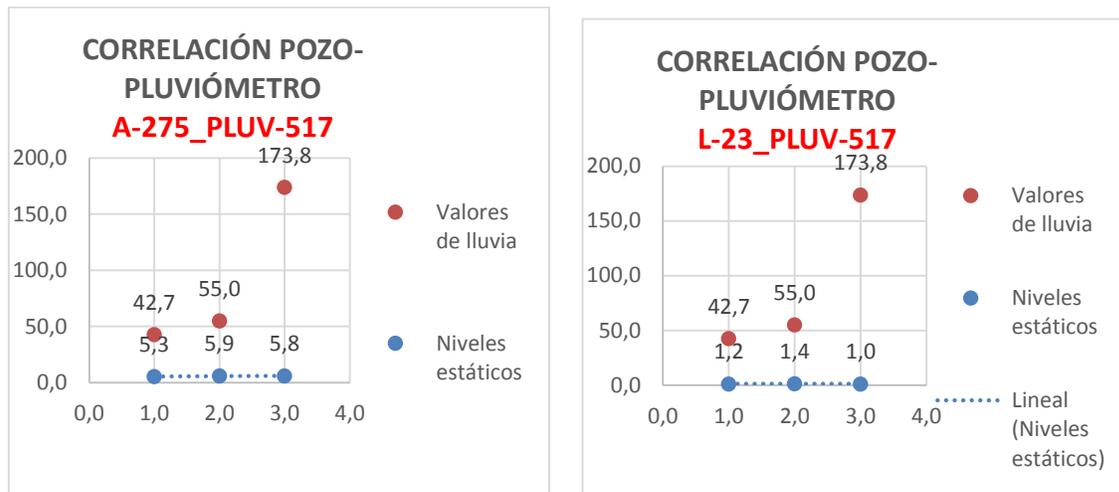


Figura 8.3. Representación de una correlación lineal de los pozos A-275 y L-23 con pluv-517.

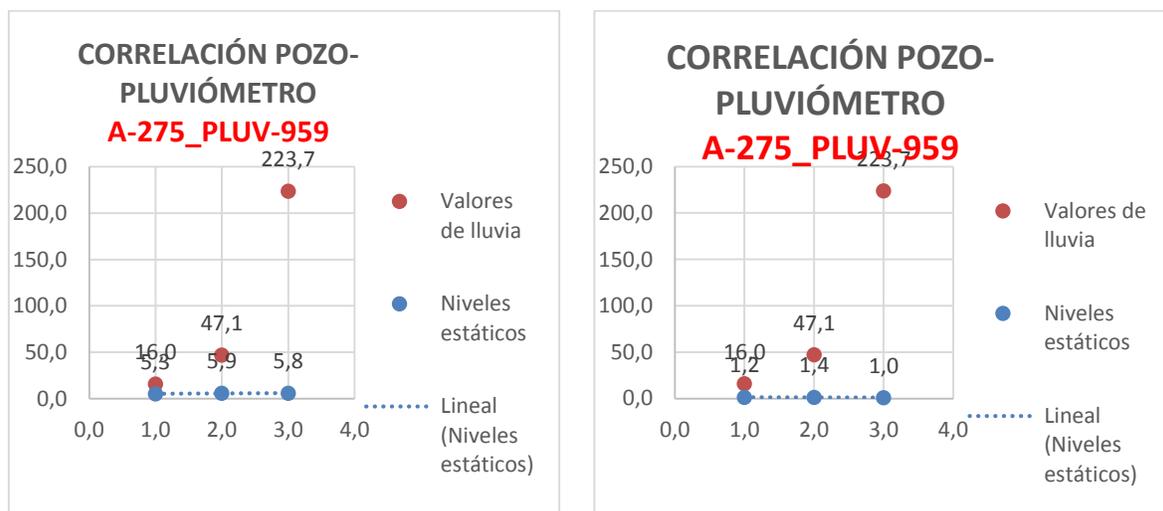


Figura 8.4. Representación de una correlación lineal de los pozos A-275 y L-23 con pluv-517.

Tabla 8.1. Representación de pozos y pluviómetro que representan el sector 2.

No	Sector	Pozo	Pluviómetro
1	Sect-II	A-275 y L-23	Pluv Lec-414

Sector 3

Pozo correlacionado	Nivel(m) febrero	Nivel(m) marzo	Nivel(m) abril	Coeficiente de correlación	
P-53	5,0	6	6,4	P-53	A-353
A-353	5,9	6,4	7,1		
Pluviómetros	Lluvia(mm) febrero	Lluvia(mm) marzo	Lluvia(mm) abril	Coeficiente de correlación	
Lec-4	35,4	14,0	120,6	0,58	0,81
Lec-8	22,9	32,6	99,6	0,8	0,95

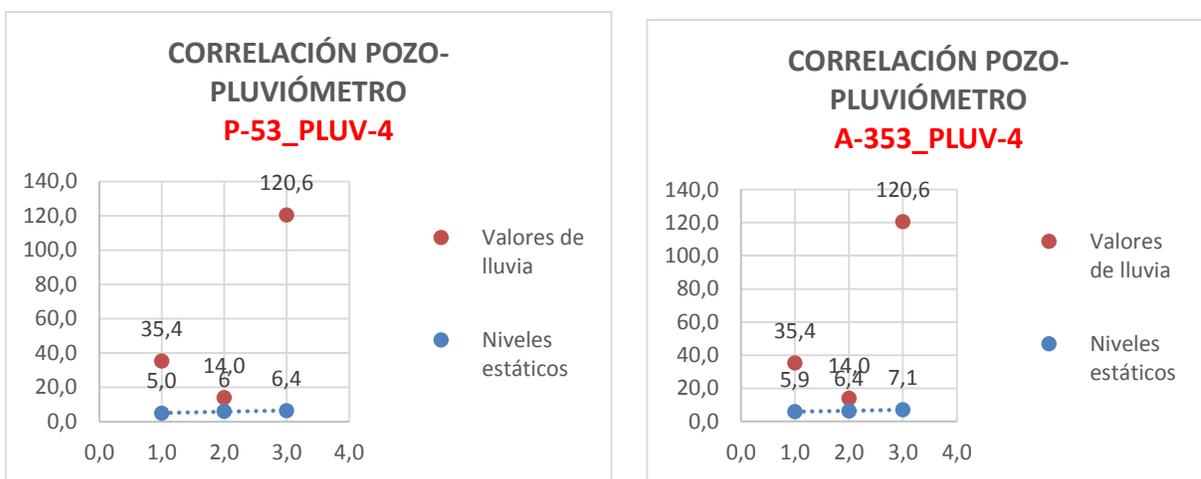


Figura 8.5. Representación de una correlación lineal de los pozos P-53 y A-353 con pluv-4.

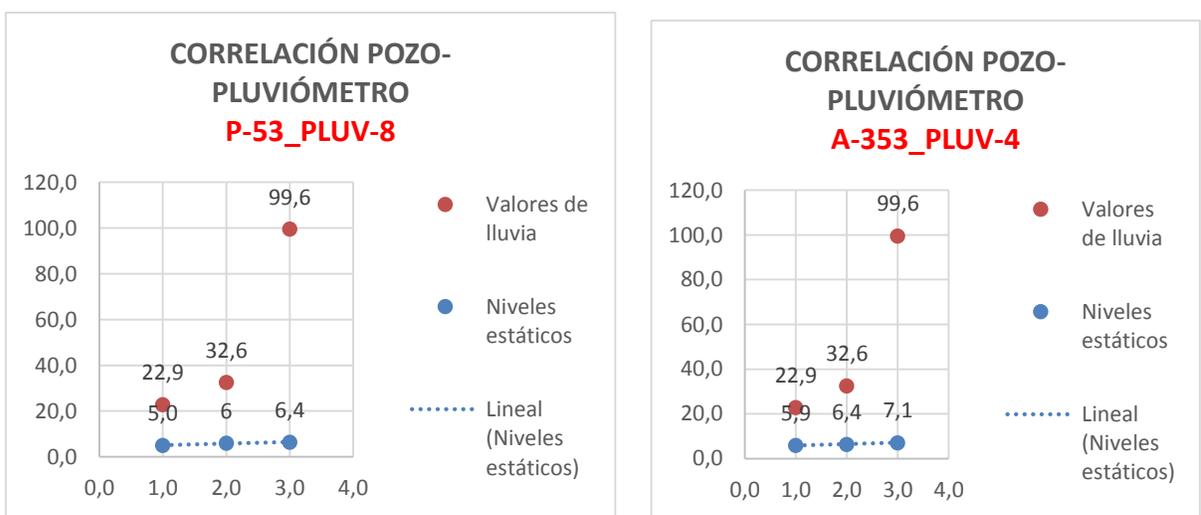


Figura 8.6. Representación de una correlación lineal de los pozos P-53 y A-353 con pluv-8.

Tabla 8.2. Representación de pozos y pluviómetro que representan el sector 3.

No	Sector	Pozo	Pluviómetro
1	Sect-III	P-53 y A-353	Pluv Lec-8

Sector 4

Pozo correlacionado	Nivel(m) febrero	Nivel(m) marzo	Nivel(m) abril	Coeficiente de correlación	
P-42	8,0	10,4	11,5	P-42	A-468
A-468	10,9	11,4	13,3		
Pluviómetros	Lluvia(mm) febrero	Lluvia(mm) marzo	Lluvia(mm) abril		
Lec-19	18,0	39,0	217,7	0,8	0,99
Lec-551	27,0	46,0	54,0	0,99	0,84

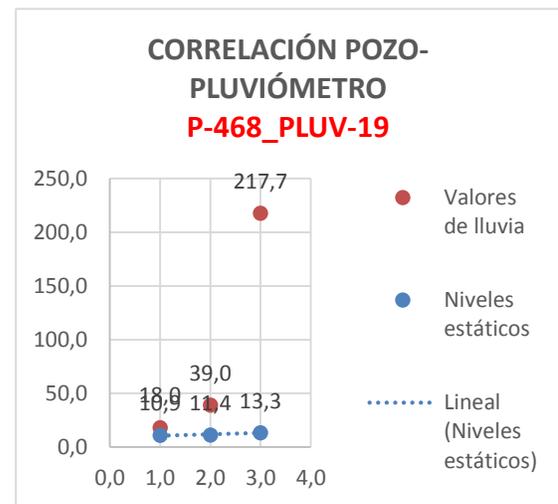
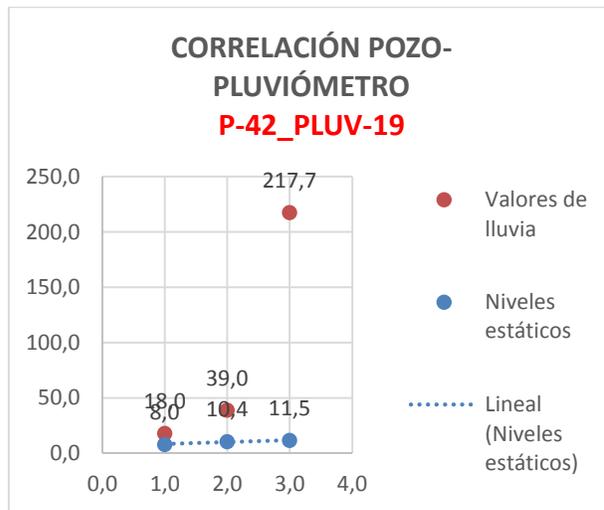


Figura 8.7. Representación de una correlación lineal de los pozos P-42 y A-468 con pluv-8.

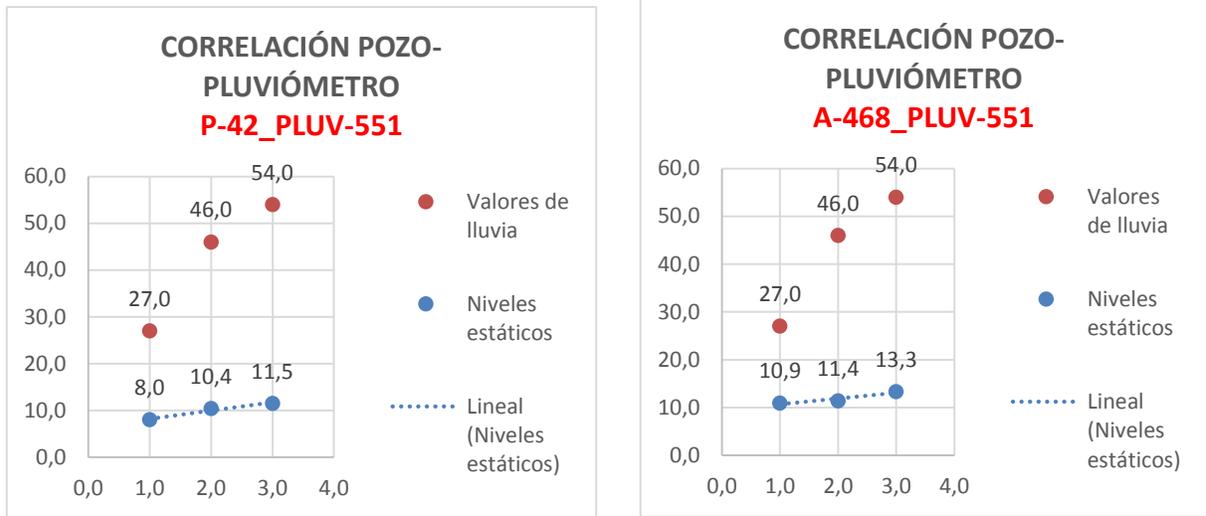


Figura 8.8. Representación de una correlación lineal de los pozos P-42 y A-468 con pluvi-551.

Tabla 8.3 Representación de pozos y pluviómetro que representan el sector 4.

No	Sector	Pozo	Pluviómetro
1	Sect-IV	P-42 y A-468	Pluv Lec-19

Sector 5

Pozo correlacionado	Nivel(m) febrero	Nivel(m) marzo	Nivel(m) abril	Coeficiente de correlación	
P-41	4,51	5,11	4,8	P-41	A-143
A-143	6,6	9,1	10,2		
Pluviómetros	Lluvia(mm) febrero	Lluvia(mm) marzo	Lluvia(mm) abril		
Lec-20	0,0	20,0	140,4	0,11	0,81
Lec-925	9,0	21,0	177,6	0,05	0,77

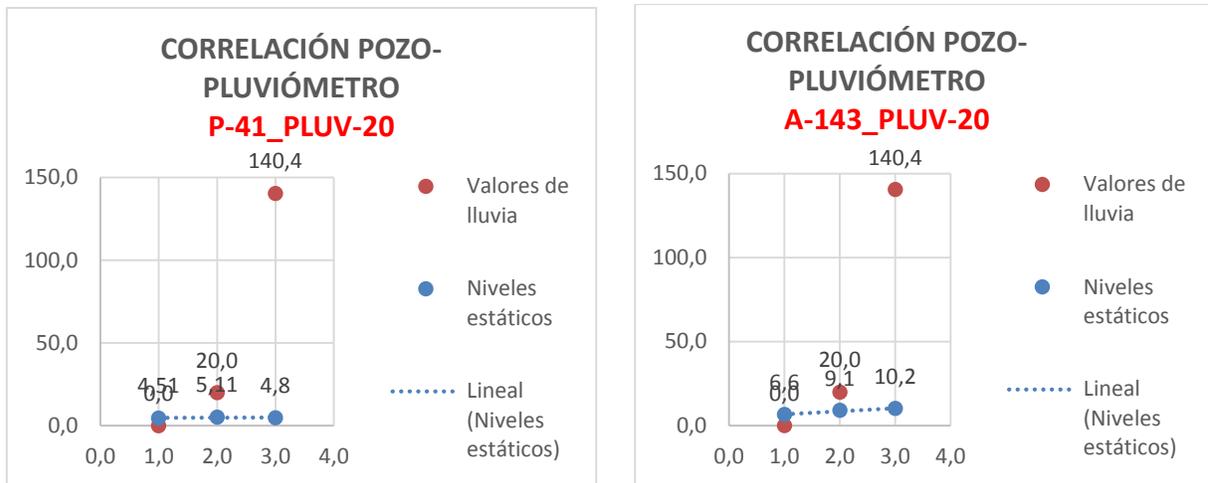


Figura 8.9. Representación de una correlación lineal de los pozos P-41 y A-143 con pluv-20.

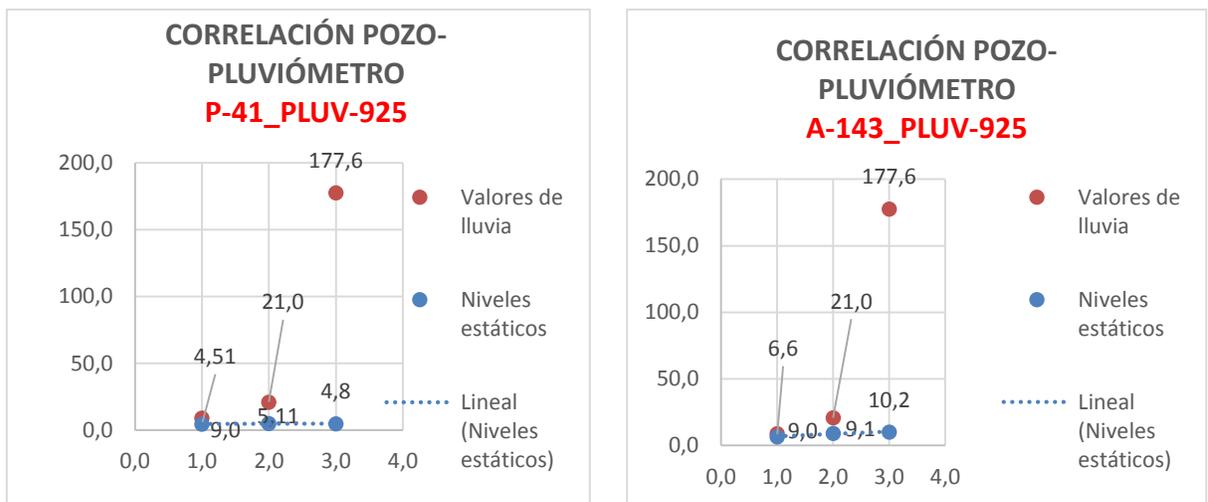


Figura 8.10. Representación de una correlación lineal de los pozos P-41 y A-143 con pluv-925.

Tabla 8.4 Representación de pozos y pluviómetro que representan el sector 5.

No	Sector	Pozo	Pluviómetro
1	Sect-V	P-41 y A-143	Pluv Lec-19

Sector 6

Pozo correlacionado	Nivel(m) febrero	Nivel(m) marzo	Nivel(m) abril	Coeficiente de correlación	
P-37	2,4	3,84	2,82	P-41	A-143
C-29	8,09	8,61	8,45		
Pluviómetros	Lluvia(mm) febrero	Lluvia(mm) marzo	Lluvia(mm) abril		
Lec-20	0,0	20,0	140,4	0,09	0,34
Lec-562	17,9	13,4	106,9	0,98	0,17

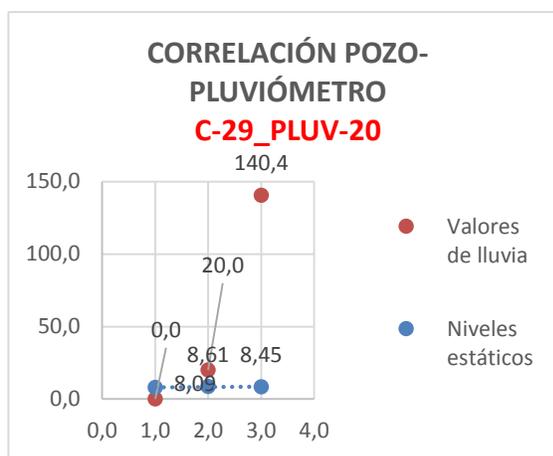
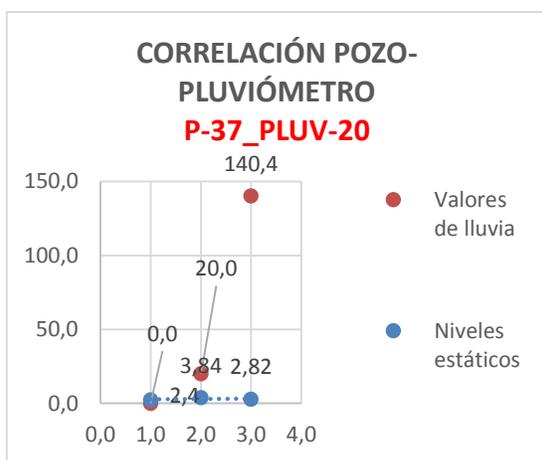


Figura 8.11. Representación de una correlación lineal de los pozos P37 y C-29 con pluv-925.

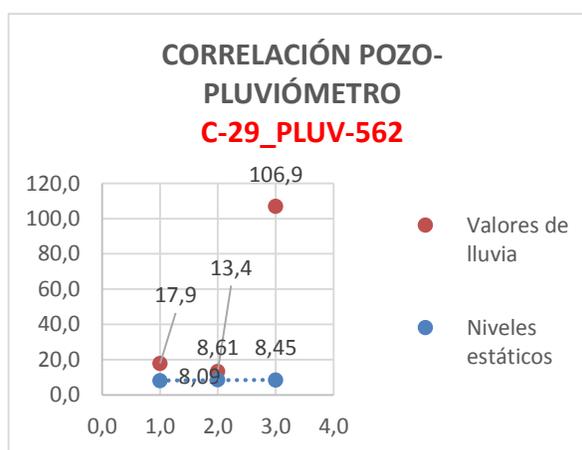
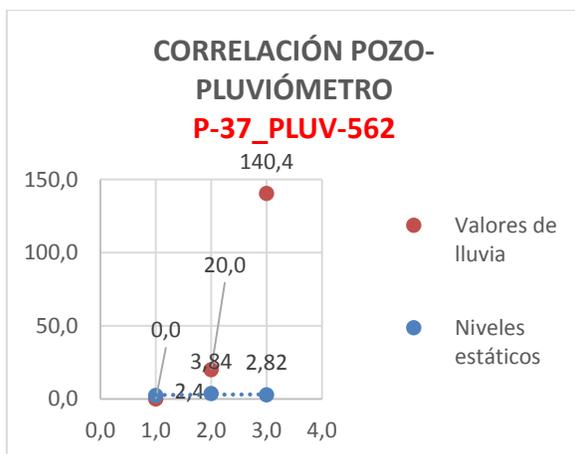


Figura 8.11. Representación de una correlación lineal de los pozos P-41 y A-143 con pluv-925.

Tabla 8.5 Representación de pozos y pluviómetro que representan el sector 6.

No	Sector	Pozo	Pluviómetro
1	Sect-VI	P-37 y C-29	Pluv Lec-562

Sector 7

Pozo correlacionado	Nivel(m) febrero	Nivel(m) marzo	Nivel(m) abril	Coeficiente de correlación	
A-275	5,28	5,9	5,8	A-275	P-80
P-80	2,2	2,8	2,25		
Pluviómetros	Lluvia(mm) febrero	Lluvia(mm) marzo	Lluvia(mm) abril		
Lec-562	17,9	13,4	106,9	0,32	0,47
Lec-933	62,6	25,2	53,4	0,79	0,98

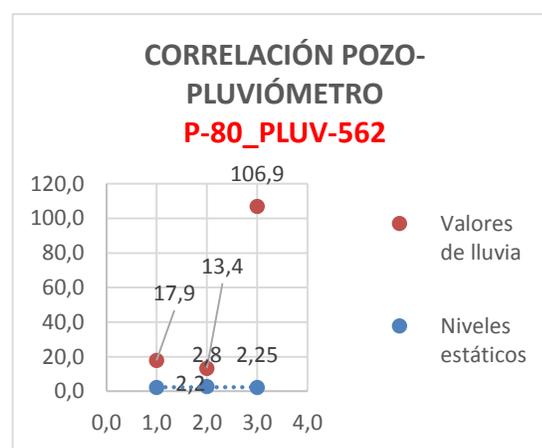
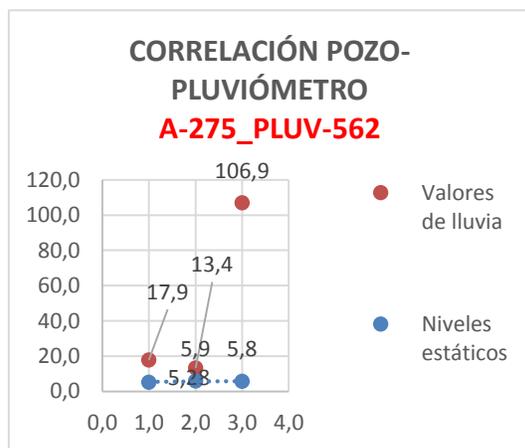


Figura 8.12. Representación de una correlación lineal de los pozos A-75 y P-80 con pluvi-562.

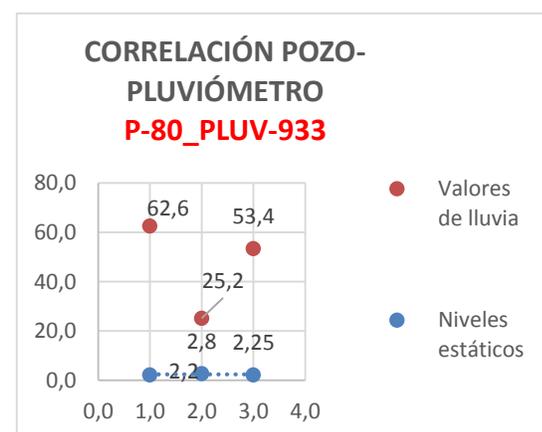
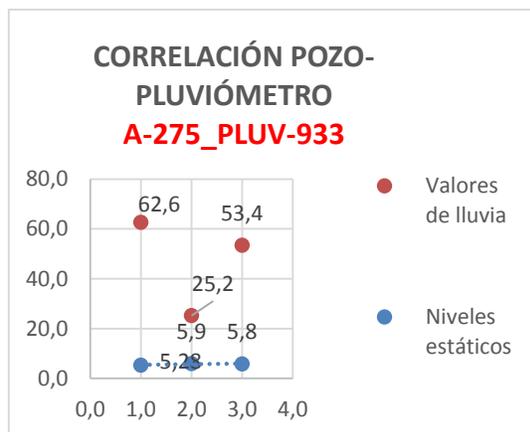


Figura 8.13. Representación de una correlación lineal de los pozos A-75 y P-80 con pluv-933.

Tabla 8.6 Representación de pozos y pluviómetro que representan el sector 6.

No	Sector	Pozo	Pluviómetro
1	Sect-VII	P-37 y C-29	Pluv Lec-562

Sector 8

Pozo correlacionado	Nivel(m) febrero	Nivel(m) marzo	Nivel(m) abril	Coeficiente de correlación		
A-270	3,87	3,89	3,72	A-270	A-64	L-9
A-64	11,95	12,1	12,2			
L-9	2,79	2,66	2,36			
Pluviómetros	Lluvia(mm) febrero	Lluvia(mm) marzo	Lluvia(mm) abril			
Lec-35	27,3	36,2	85,3	0,96	0,87	0,98
Lec-562	17,9	13,4	106,9	0,99	0,77	0,94

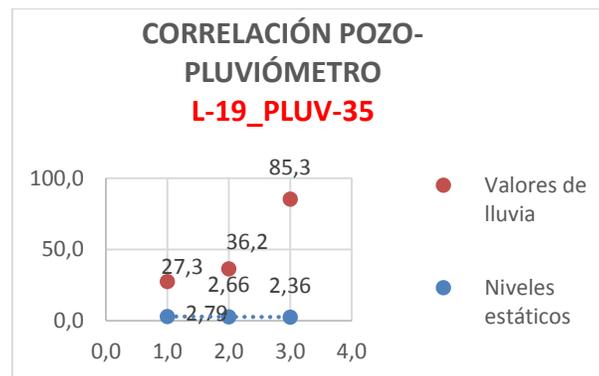
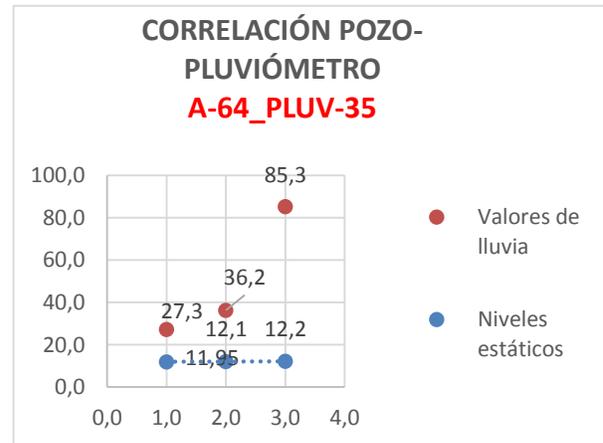
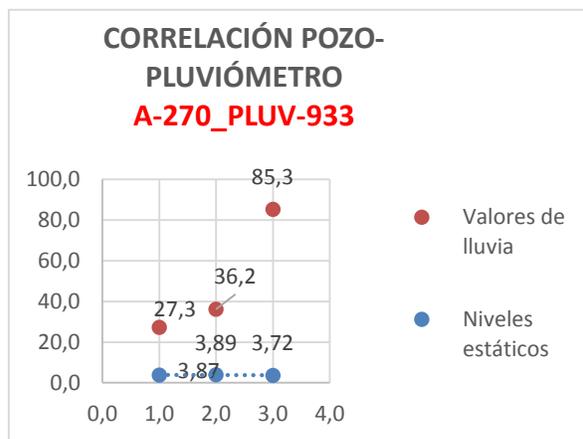


Figura 8.14. Representación de una correlación lineal de los pozos A-270, A-64 y L-9 con pluv-35.

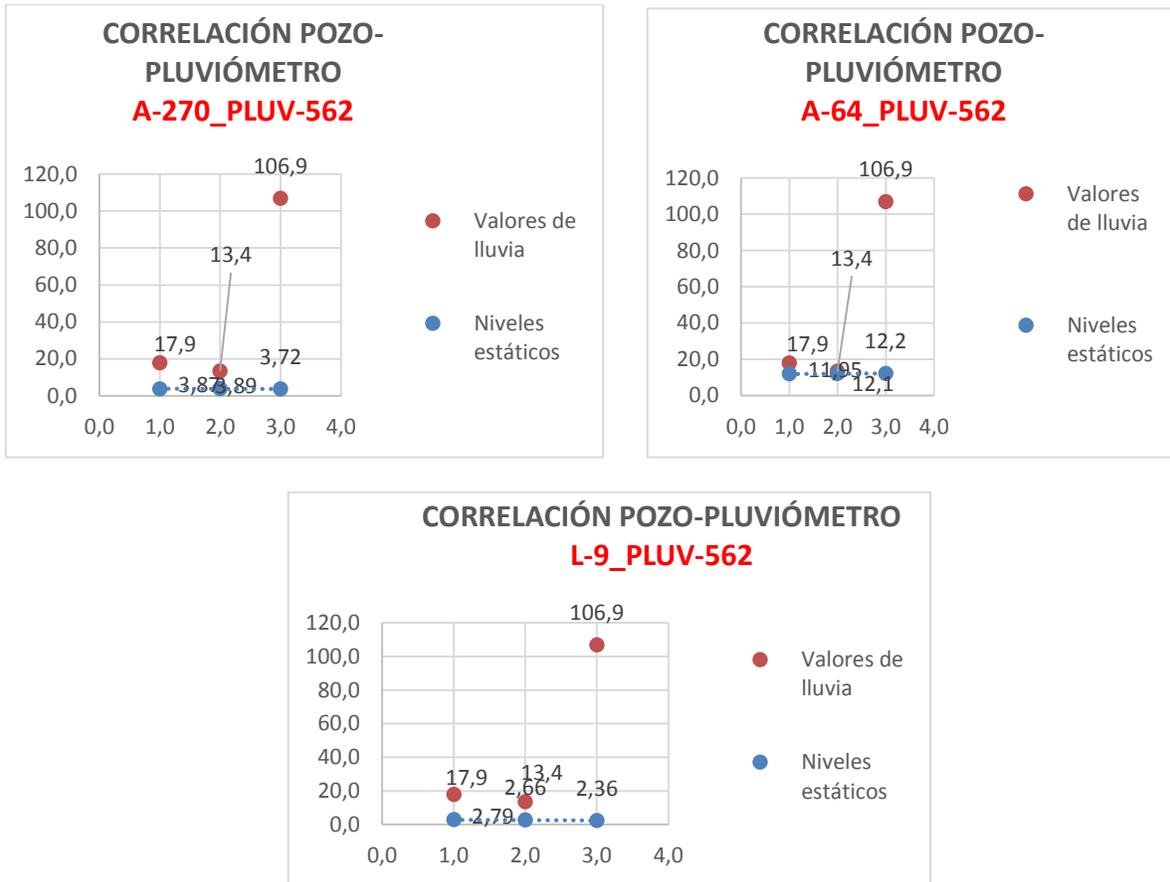


Figura 8.15. Representación de una correlación lineal de los pozos A-270, A-64 y L-9 pluv-562.

Tabla 8.6 Representación de pozos y pluviómetro que representan el sector 8.

No	Sector	Pozo	Pluviómetro
1	Sect-VIII	A-270, A-64 y L-9	Pluv Lec- 35

Anexo 9. Cálculo de la transmisibilidad por sectores hidrogeológicos.

Sector	Intervalo isoyeta	Valor medio	Area(km ²)	Producto	Transmisibilidad (m ² /d)
1	Below 200	100	8,7	870	1367,9
	200-500	350	19,23	6730,5	
	500-1000	750	22,9	17175	
	1000-2500	1750	95,98	167965	
	2500-5000	3750	3,39	12712,5	
2	Below 200	100	164,62	16462	102,7
	200-500	350	1,78	623	
3	Below 200	100	2,58	258	1652,4
	200-500	350	13,16	4606	
	500-1000	750	25,62	19215	
	1000-2500	1750	39	68250	
	2500-5000	3750	19,29	72337,5	
	5000-7500	6250	18,17	113562,5	
	7500-10000	8750	7,68	67200	
4	Below 200	100	86,24	8624	231,7
	200-500	350	5,82	2037	
	500-1000	750	4,42	3315	
	1000-2500	1750	5,52	9660	
5	500-1000	750	0,38	285	10500,1
	1000-2500	1750	5,8	10150	
	2500-5000	3750	17,69	66337,5	
	5000-7500	6250	22,17	138562,5	
	7500-10000	8750	23,7	207375	
	10000-20000	15000	61,34	920100	
	20000-40000	30000	1,72	51600	
6	Below 200	100	20,79	2079	4262,7
	200-500	350	6,53	2285,5	
	500-1000	750	5,94	4455	
	1000-2500	1750	19,47	34072,5	
	2500-5000	3750	20,62	77325	
	5000-7500	6250	15,18	94875	
	7500-10000	8750	10,92	95550	
	10000-20000	15000	10,55	158250	
7	Below 200	100	35,15	3515	2125,7
	200-500	350	3,2	1120	
	500-1000	750	4,73	3547,5	

	1000-2500	1750	11,73	20527,5	
	2500-5000	3750	6,42	24075	
	5000-7500	6250	4,09	25562,5	
	7500-10000	8750	4,08	35700	
	10000-20000	15000	2,6	39000	
8	200-500	350	0,015	5,25	17767,1
	500-1000	750	0,185	138,75	
	1000-2500	1750	2,33	4077,5	
	2500-5000	3750	2,7	10125	
	5000-7500	6250	3,51	21937,5	
	7500-10000	8750	9,58	83825	
	10000-20000	15000	55,44	831600	
	20000-40000	30000	31,78	953400	
	40000-60000	50000	12,95	647500	
	60000-80000	70000	2,31	161700	
	Above 80000	90000	1,1	99000	
Total			980,8	5421261,5	5527,4

Anexo 10. Comportamiento de los niveles estáticos en los sectores.

Sector 1

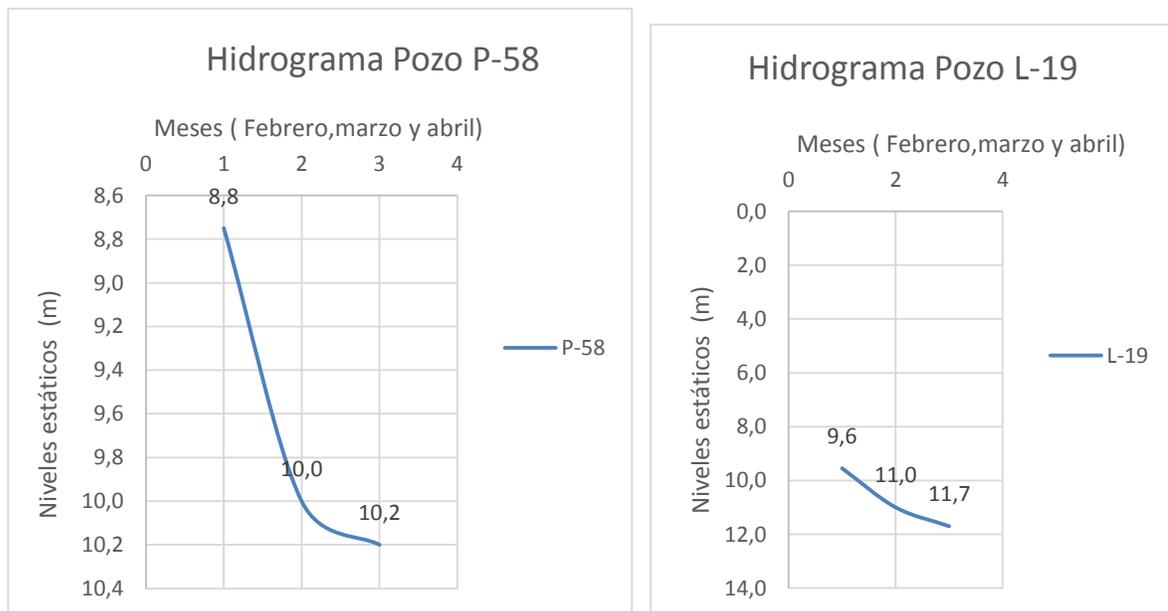


Figura 10.1. Hidrogramas sector 1.

Sector 2

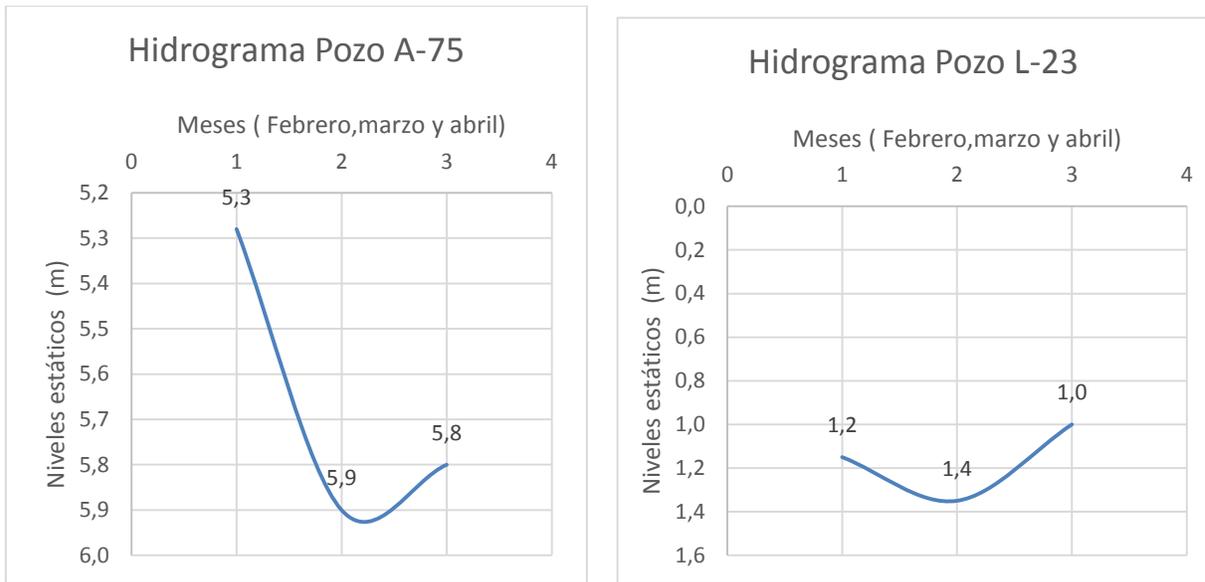


Figura 10.2. Hidrogramas sector 2.

Tabla 10.1. Valores de los niveles estáticos de los meses de estudio. Sector 2

Pozos/Nivel estáticos	Febrero	Marzo	Abril
A-275	5,3	5,9	5,8
L-23	1,2	1,4	1,0
Medias	3,215	3,625	3,4

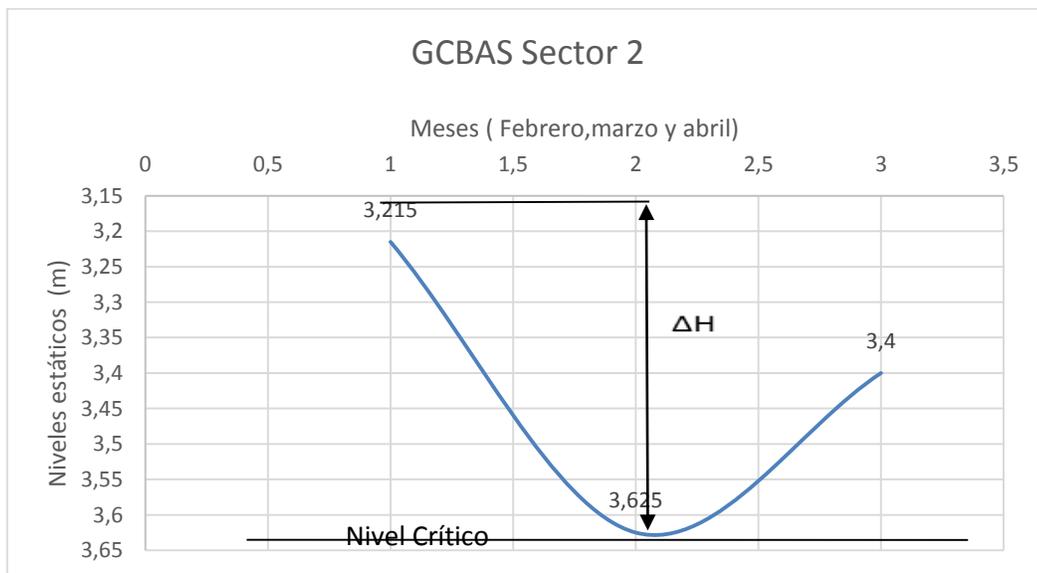


Figura 10.4. GCBAS sector 2.

Sector 3

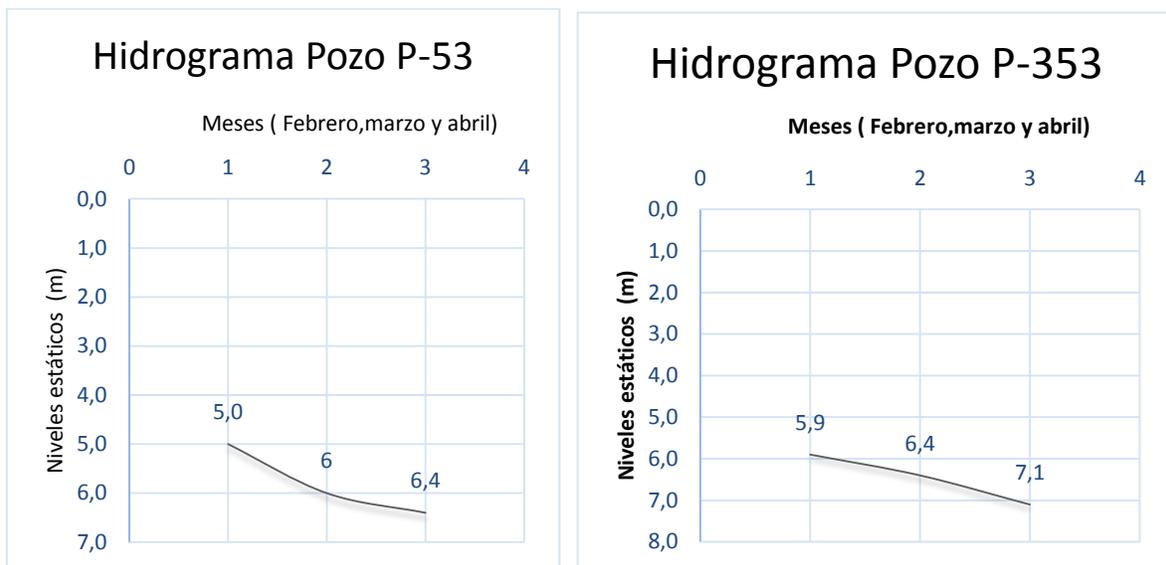


Figura 10.5. Hidrogramas Sector 3.

Tabla 10.2. Valores de los niveles estáticos de los meses de estudio. Sector 3.

Pozos/Nivel estáticos	Febrero	Marzo	Abril
P-53	5,0	6	6,4
A-353	5,9	6,4	7,1
Medias	5,45	6,2	6,75

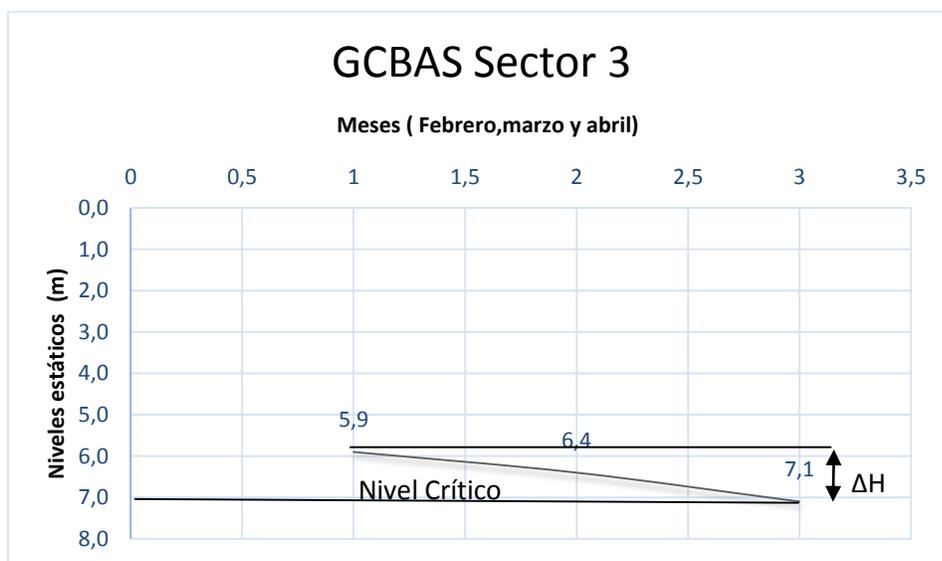


Figura 10.6. GCBAS sector 3

Sector 4

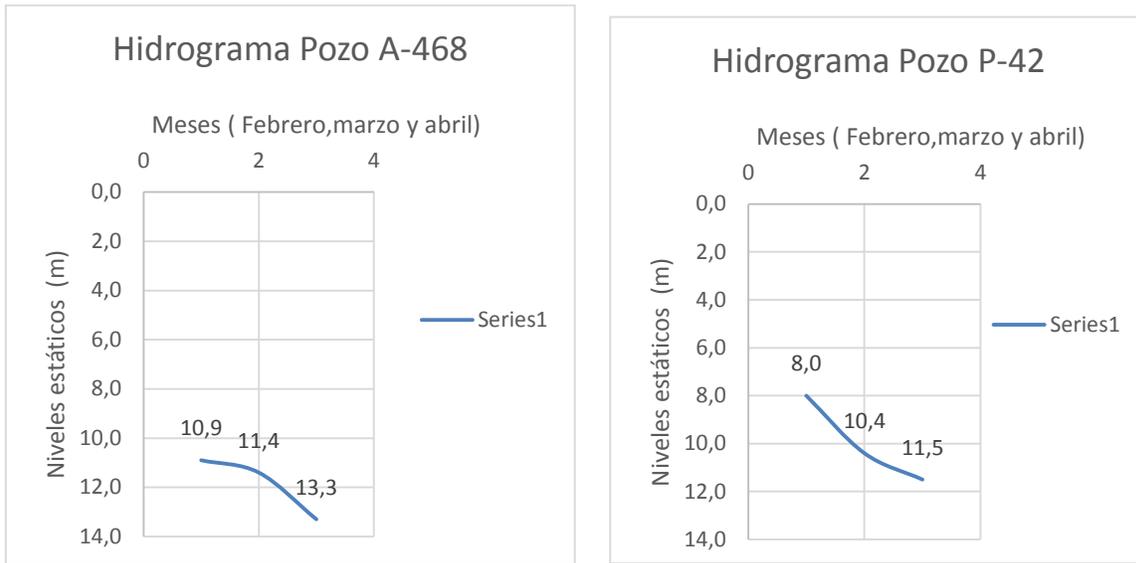


Figura 10.7 Hidrogramas Sector 4.

Tabla 10.3. Valores de los niveles estáticos de los meses de estudio. Sector 4.

Pozos/Nivel estáticos	Febrero	Marzo	Abril
P-42	8,0	10,4	11,5
A-468	10,9	11,4	13,3
Medias	9,45	10,9	12,4

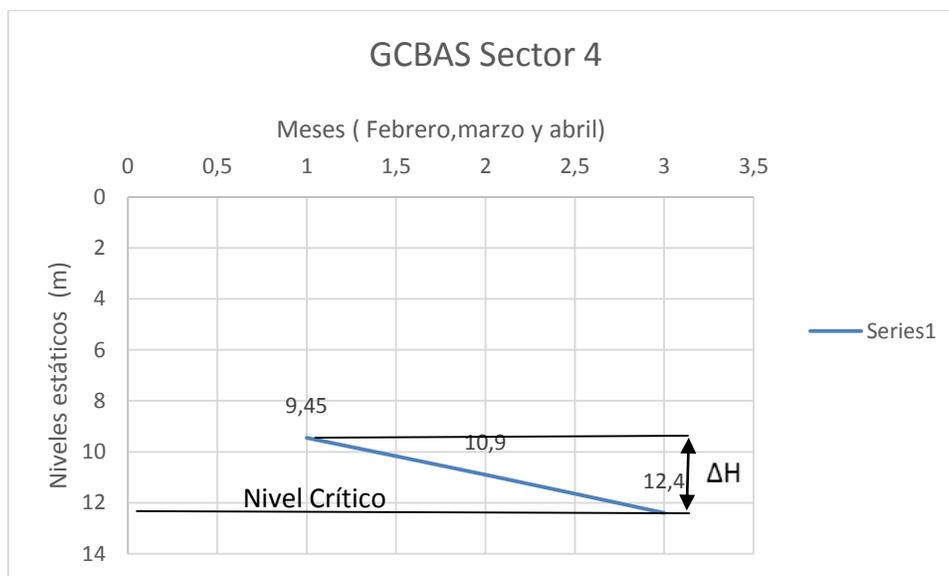


Figura 10.8. GCBAS sector 4.

Sector 5

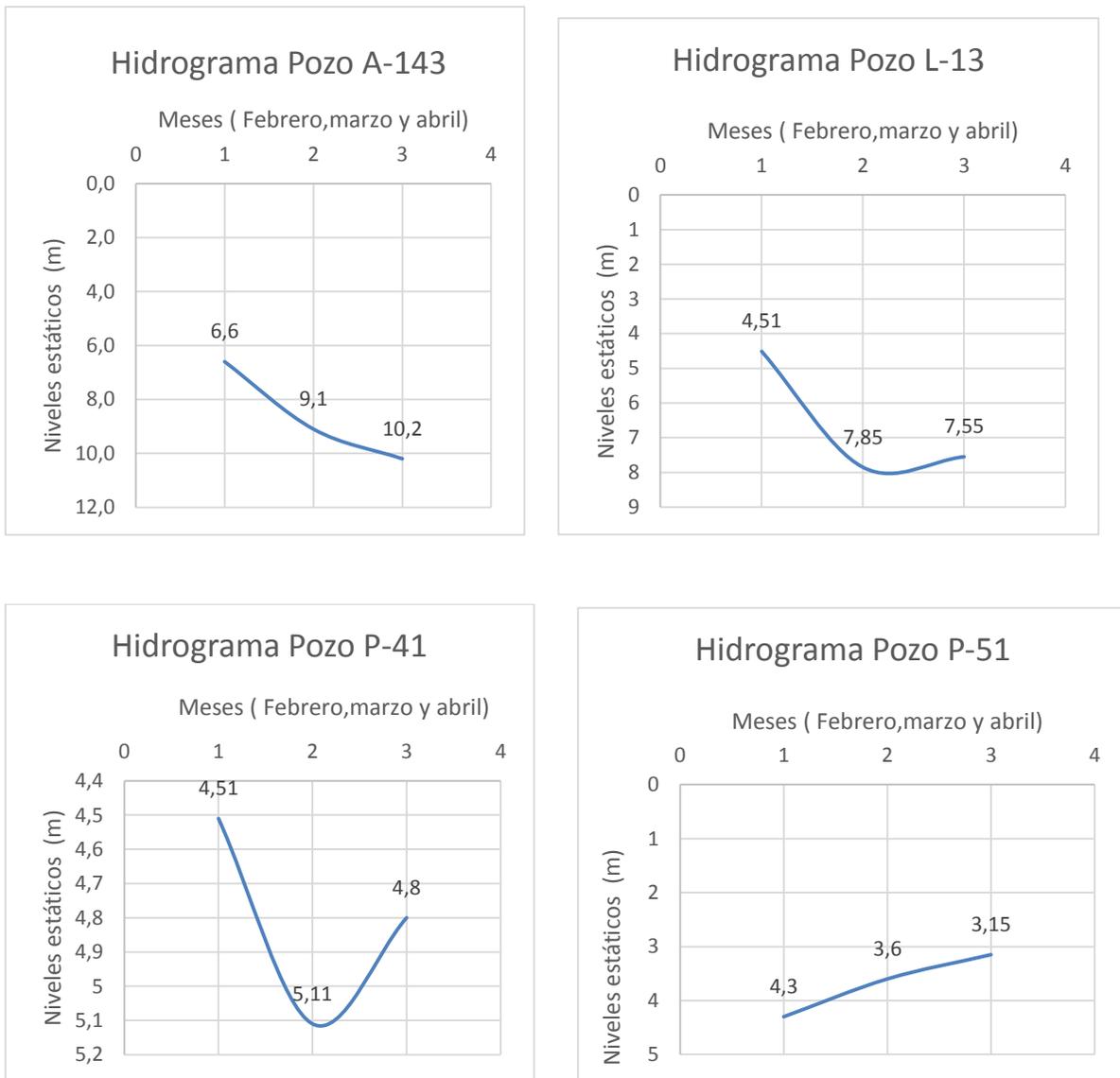


Figura 10.9. Hidrogramas sector 5.

Tabla 10.4. Valores de los niveles estáticos de los meses de estudio. Sector 5.

Pozos/Nivel estáticos	Febrero	Marzo	Abril
A-143	6,6	9,1	10,2
L-13	4,51	7,85	7,55
P-41	4,51	5,11	4,8
P-51	4,3	3,6	3,15
Medias	4,98	6,415	6,425

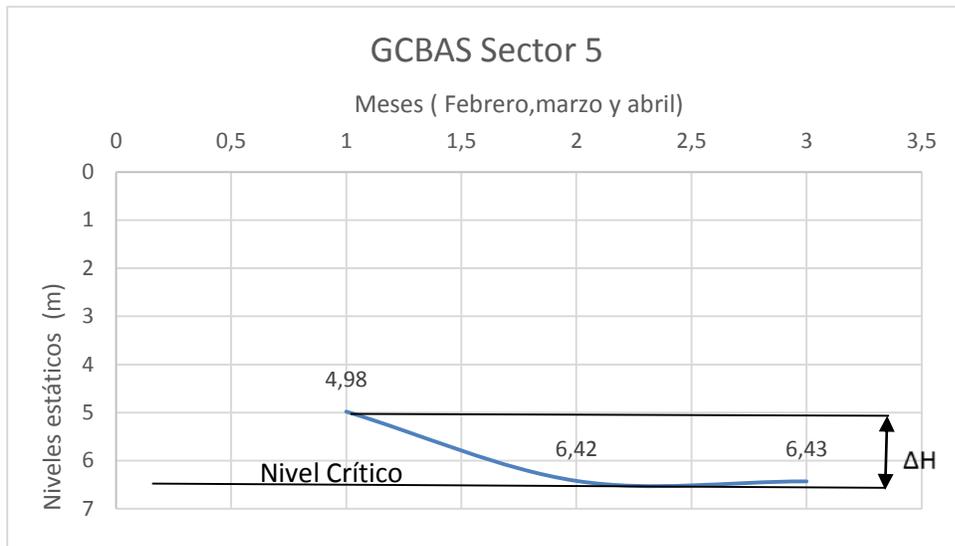


Figura 10.10. GCBAS sector 5.

Sector 6

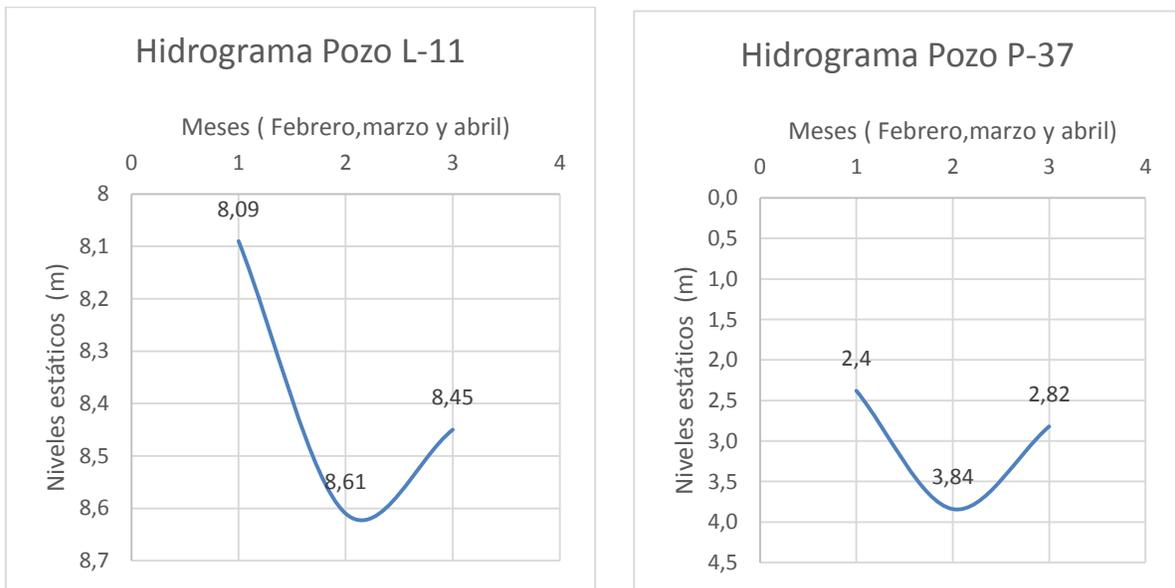


Figura 10.11. Hidrogramas sector 6.

Tabla 10.5. Valores de los niveles estáticos de los meses de estudio. Sector 6.

Pozos/Nivel estáticos	Febrero	Marzo	Abril
P-37	2,4	3,84	2,82
L-11	8,09	8,61	8,45
Medias	5,235	6,225	5,635

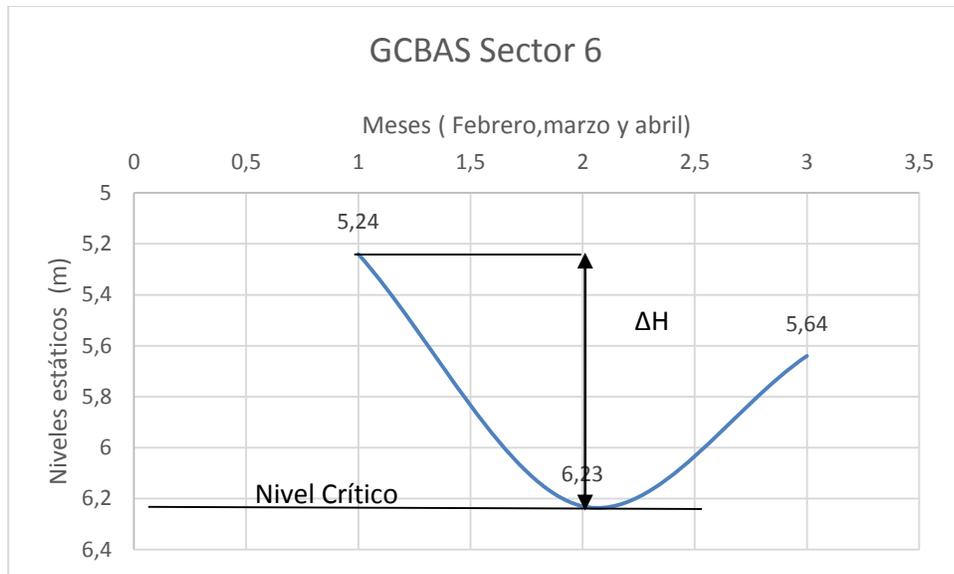


Figura 10.12. GCBAS sector 6.

Sector 7

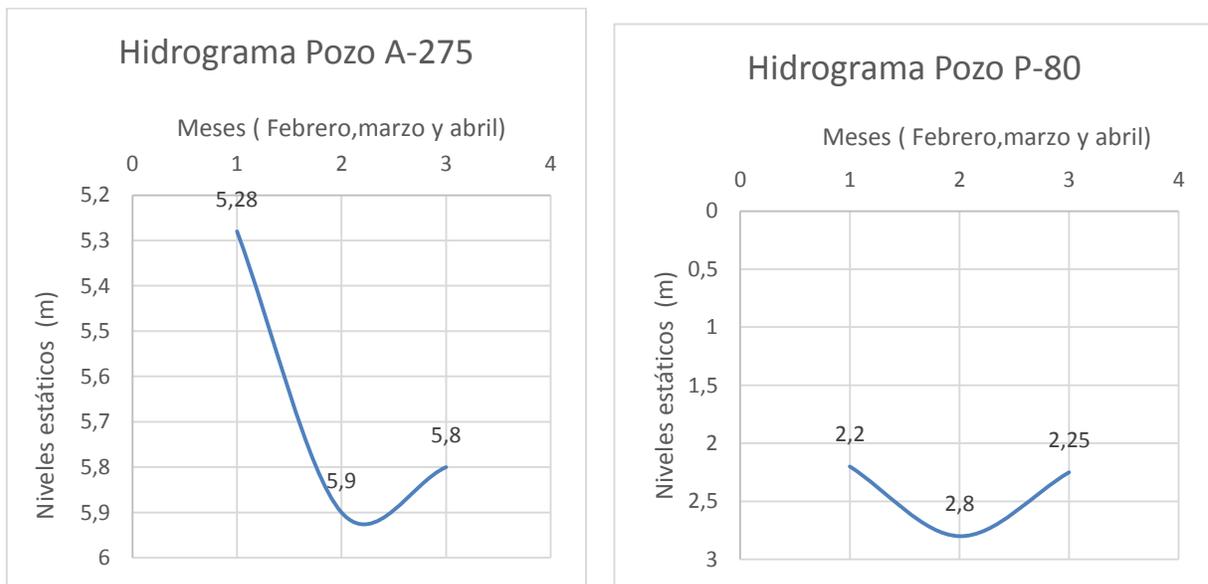


Figura 10.13 Hidrogramas sector 7.

Tabla 10.5. Valores de los niveles estáticos de los meses de estudio. Sector 7.

Pozos/Nivel estáticos	Febrero	Marzo	Abril
A-275	5,28	5,9	5,8
P-58	2,2	2,8	2,25
Medias	3,74	4,35	4,025

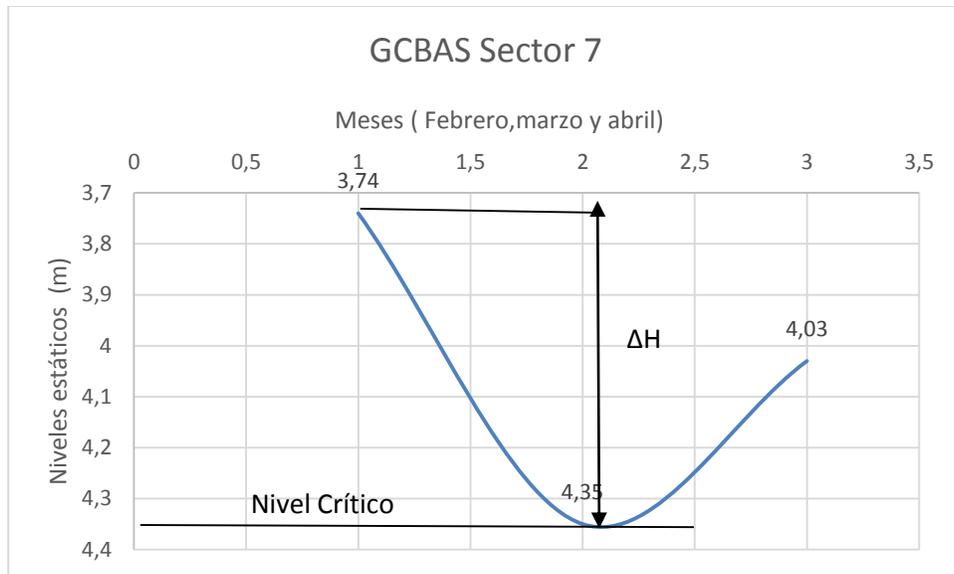


Figura 10.14 GCBAS sector 7.

Sector 8

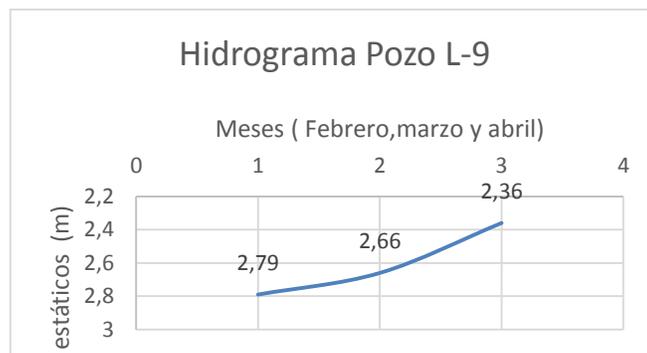
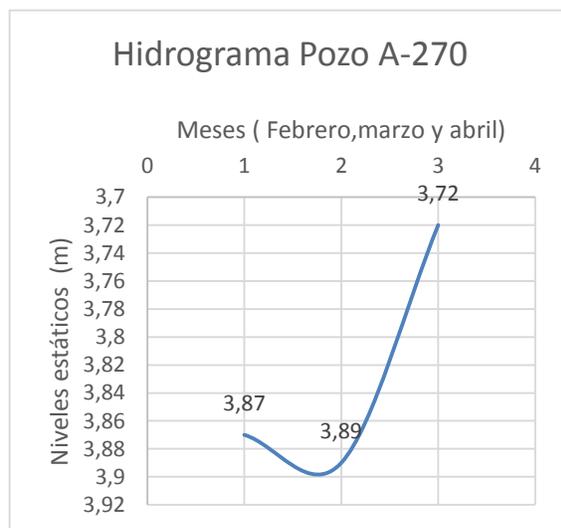
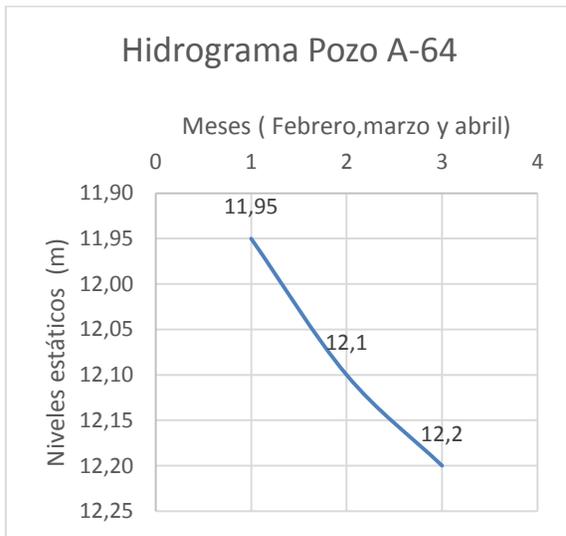


Figura 10.15. Hidrogramas sector 8.

Tabla 10.5. Valores de los niveles estáticos de los meses de estudio. Sector 7.

Pozos/Nivel estáticos	Febrero	Marzo	Abril
A-64	5,28	5,9	5,8
A-270	3,87	3,89	3,72
L-9	2,79	2,66	2,36
Medias	3,98	4,15	3,96

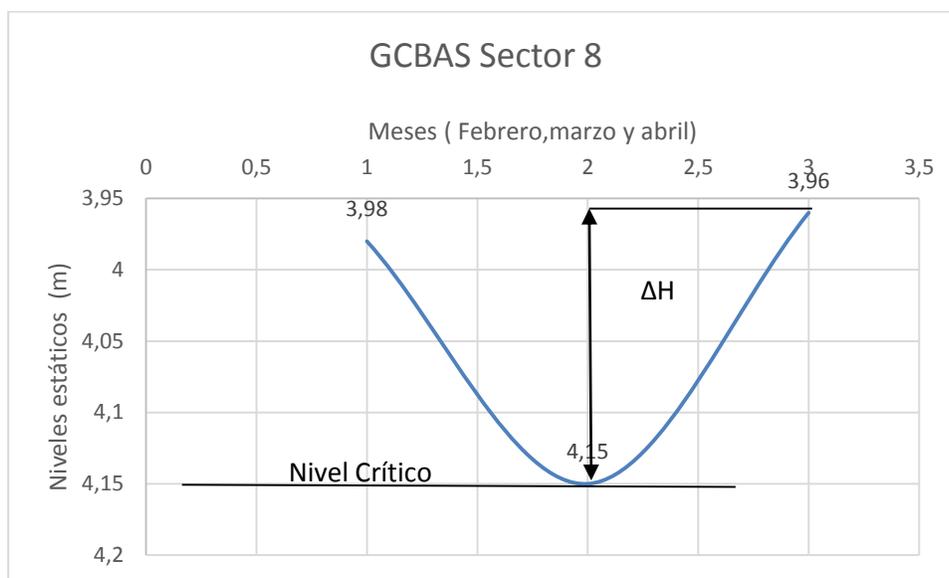


Figura 10.16. GCBAS sector 8.

Anexo 11. Representación del por ciento de explotación de las aguas subterráneas.

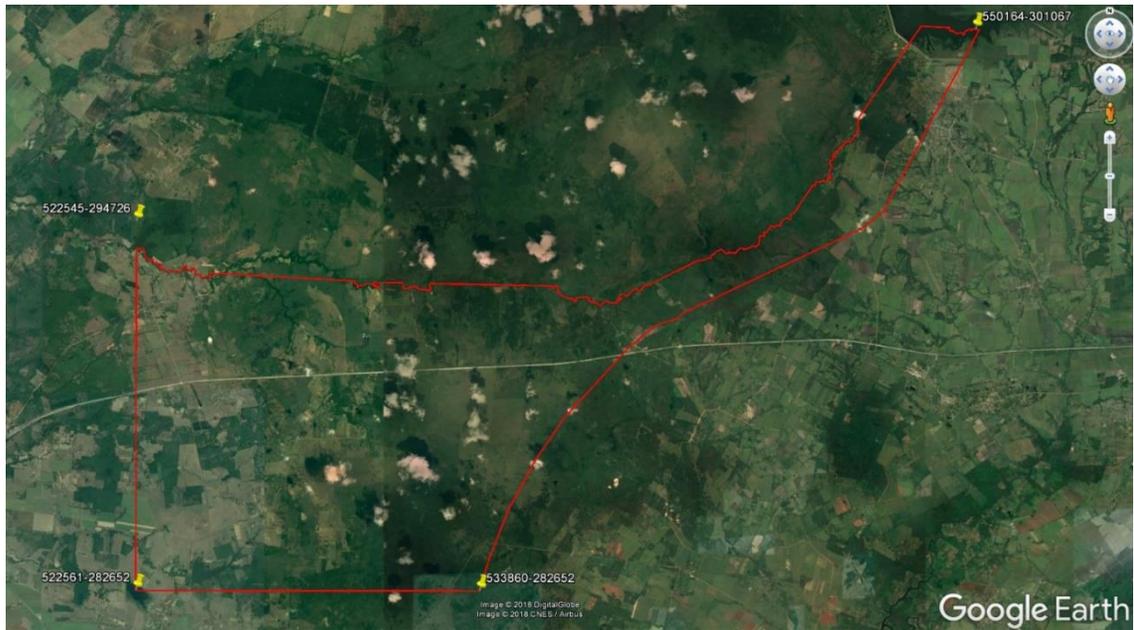


Figura 11.1. Segundo Sector hidrogeológico



Figura 11.2. Tercer Sector hidrogeológico.

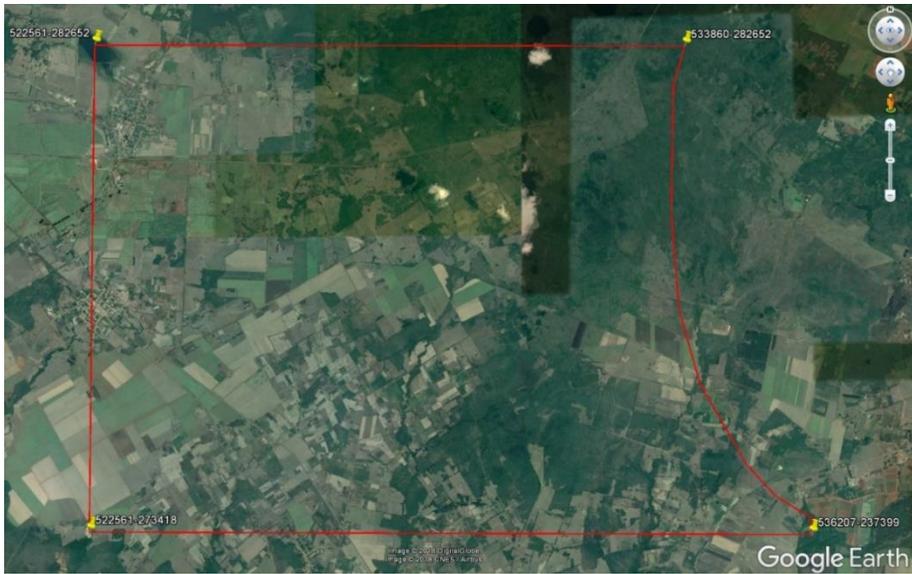


Figura 11.3 Cuarto Sector hidrogeológico



Figura 11.4. Quinto Sector hidrogeológico

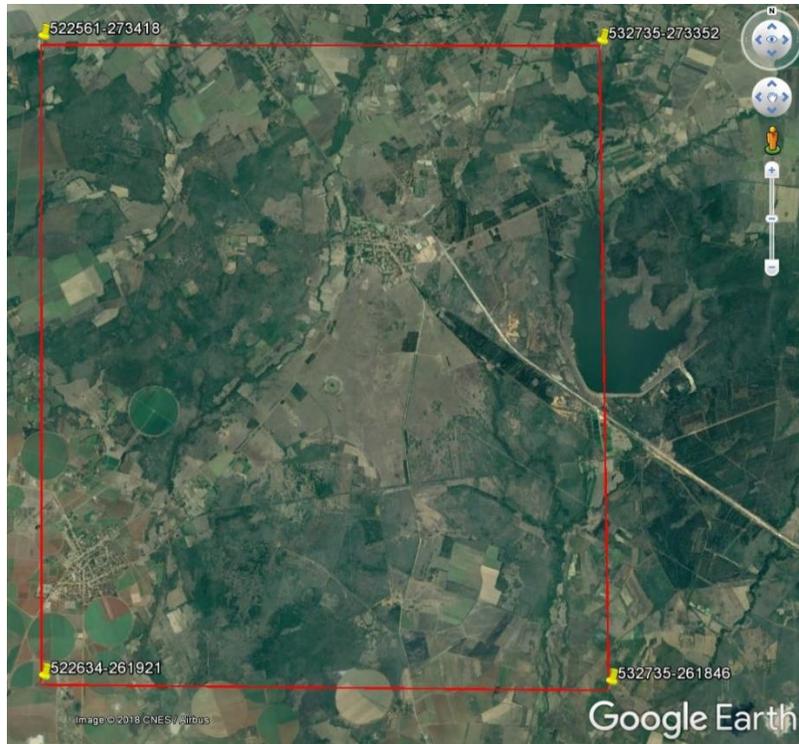


Figura 11.5. Sexto Sector hidrogeológico

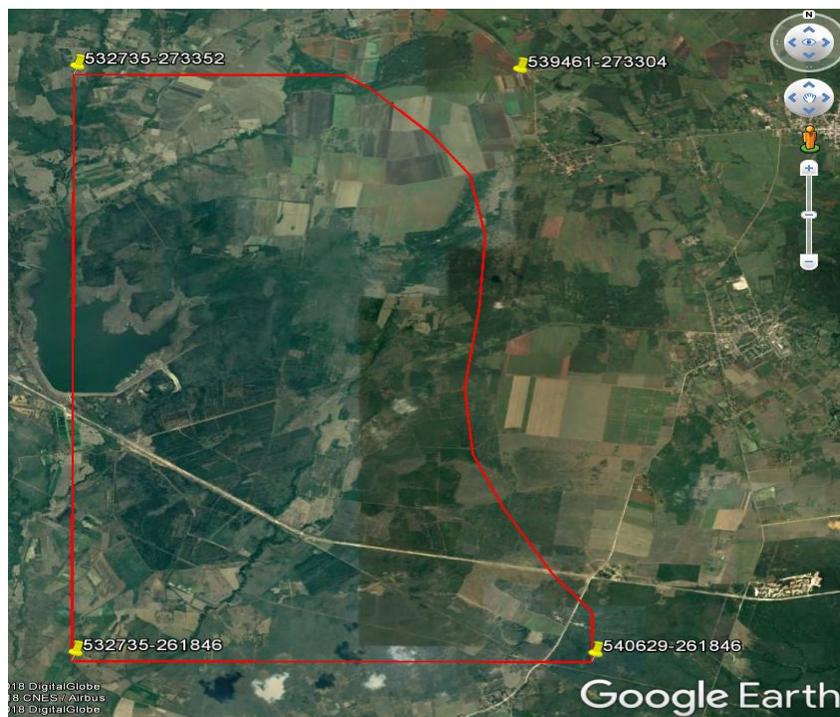


Figura 11.6. Séptimo Sector hidrogeológico



Figura 11.7. Octavo Sector hidrogeológico