



Universidad de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez"

Facultad Geología y Minas

**Evaluación de la calidad de las aguas
subterráneas del sector noroeste del Valle del
Cauto, provincia Holguín.**

Tesis en opción al título de Máster en Geología

Autor(a): Yarisleydis Rodríguez Hechavarría

Tutor(a): M.Sc. Amalia Beatriz Riverón Zaldívar

MOA 2024



Universidad de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez"

Facultad de Geología y Minas

Departamento de Geología

Título: Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas del sector noroeste del Valle del Cauto, provincia Holguín.

Tesis en opción al título académico de Máster en Geología

Autor(a): Yarisleydis Rodríguez Hechavarría

Tutor(a): M.Sc. Amalia Beatriz Riverón Zaldívar

Moa, 2024

PENSAMIENTO

“los científicos leen en la naturaleza, incluso leen cosas que están escritas con letras muy pequeñas, pero los ingenieros; los ingenieros escriben en la naturaleza.”

Carlos Fernández Casado

DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Declaro que soy autor(a) de este trabajo de tesis y que autorizo a la Universidad de Moa a hacer uso del mismo, con la finalidad que estime conveniente.

Firma: _____

AGRADECIMIENTOS

A todos los que contribuyeron que este trabajo se realizara.

DEDICATORIA

A mis padres, a mis hermanos, a mis familiares, amigos, profesores, compañeros de estudios y trabajos; en fin a todos los que contribuyeron que este trabajo se realizara.

RESUMEN

El agua es vital para el ser humano y el desarrollo de la vida en el planeta. En los últimos años se ha visto afectada debido a diferentes causas naturales y antrópicas y se ha hecho necesaria su cuantificación y evaluación, por tal motivo surge la presente investigación, cuyo objetivo es evaluar la calidad de las aguas subterráneas del sector noroeste del Valle del Cauto mediante sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas para consumo humano. Se determinaron las principales fuentes de contaminación que afectan las aguas subterráneas, las características físicas, químicas y microbiológicas de estas y se clasificaron según los diferentes autores, las normas cubanas NC 827:2017, NC 1021:2014 y la norma de la OMS, 2006. Las principales fuentes de contaminación se encuentran asociadas a la actividad antrópica. Las aguas analizadas según Aliokin son Hidrocarbonatadas sódicas tipo 3. Los lugares con mayores perspectivas para localizar aguas subterráneas que sean favorables para el consumo humano se encuentran hacia la parte norte del área de estudio y en algunos puntos aislados hacia el sur oeste. Se propone un plan de medidas con el objetivo de prevenir y mitigar los principales puntos de peligros y focos de contaminación que afectan la calidad de estas aguas.

SUMMARY

Water is vital for human beings and the development of life on the planet; In recent years it has been affected due to different natural and anthropogenic causes and its quantification and evaluation has become necessary, for this reason the present investigation arises, whose objective is to evaluate the quality of groundwater in the northwest sector of the Cauto Valley through its physical, chemical and microbiological properties for human consumption. The main sources of contamination that affect groundwater, their physical, chemical and microbiological characteristics were determined and classified according to the different authors, the Cuban standards NC 827:2017, NC 1021:2014 and the standard of the WHO, 2006. The main sources of pollution are associated with anthropogenic activity. The waters analyzed according to Aliokin are Sodium Hydrocarbonated Type 3. The places with the greatest prospects for locating groundwater that are favorable for human consumption are located towards the northern part of the study area and in some isolated points towards the south west. A plan of measures was prepared with the objective of preventing and mitigating the main points of danger and sources of contamination that affect the quality of these waters.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	3
CAPÍTULO I - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	11
1.1 Introducción	11
1.2 Características físico-geográficas	11
1.2.1 Ubicación geográfica	11
1.2.2 Clima, hidrología y relieve	12
1.2.3 Sismicidad.....	13
1.2.4 Características socioeconómicas del área de estudio.....	14
1.3 Características geológicas e hidrogeológicas	15
1.3.1 Estratigrafía.....	15
1.3.2 Hidrogeología	25
1.3.3 Geomorfología	29
1.3.4 Tectónica.....	32
CAPÍTULO II - METODOLOGÍA DE LOS TRABAJOS REALIZADOS	34
2.1. Introducción.....	34
2.2. Etapa I: Trabajos preliminares.....	34
2.3. Etapa II: Trabajo de campo y laboratorio	35
2.3.1. Determinación de los principales focos contaminantes.....	35
2.3.2. Muestreo hidroquímico	35
2.3.3 Análisis físicos, químicos y microbiológicos.....	36
2.4. Etapa III: Trabajos de gabinete.....	37
CAPÍTULO III - EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL SECTOR NOROESTE DEL VALLE DEL CAUTO, PROVINCIA HOLGUÍN	42
3.1. Introducción.....	42
3.2. Principales fuentes de contaminación de las aguas	42
3.3. Caracterización físico-química de las aguas.....	45
3.4. Aguas de calidad favorable para consumo humano	51
3.5. Plan de medidas para prevenir la contaminación de las aguas	55
CONCLUSIONES	56
RECOMENDACIONES.....	57
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
BIBLIOGRAFIA	60
ANEXOS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1 Ubicación geográfica del área de estudio.
- Figura 2 Red fluvial del área.
- Figura 3 Esquema geológico del área de estudio. Escala 1:250 000 (Tomado del Mapa hidrogeológico de Cuba a Escala 1:100 000).
- Figura 4 Sistemática hidrogeológica de la Cuenca Cauto, provincia Holguín (GEARH).
- Figura 5 Mapa morfo-tectónico de Cuba Oriental.
- Figura 6 Flujograma de la investigación.
- Figura 7 Distribución de los principales puntos de peligros y focos contaminantes.
- Figura 8 Pozos destapados, con letrinas, corrales y corraletas en sus alrededores.
- Figura 9 Vertido de desechos sólidos cerca de las aguas superficiales.
- Figura 10 Laguna de Oxidación para los residuales líquidos del CAI Urbano Noris. Los residuales son muy agresivos por su alto contenido en alcohol, se observa el agua de color blanquecino.
- Figura 11 Comportamiento de la mineralización.
- Figura 12 Comportamiento del pH.
- Figura 13 Comportamiento de la dureza total.
- Figura 14 Comportamiento del grado de contaminación salina.
- Figura 15 Comportamiento del índice de salinidad marina.
- Figura 16 Cantidad de parámetros afectados por puntos de muestreo.
- Figura 17 Distribución de las áreas con más perspectivas a utilizar como agua para consumo humano.
- Figura 18 Mapa Geológico de Cuba a escala 1:100 000, tomado de IGP.
- Figura 19 Leyenda del Mapa Geológico de la Figura 17.
- Figura 20 Comportamiento de los Cloruros.
- Figura 21 Comportamiento del Calcio.

Figura 22	Comportamiento del Magnesio.
Figura 23	Comportamiento del Sodio.
Figura 24	Comportamiento del Nitrito.
Figura 25	Comportamiento del Nitrato.

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	Ubicación geográfica del área de estudio.
Tabla 2	Comportamiento de la sismicidad y sus componentes por municipios.
Tabla 3	Métodos analíticos empleados para la realización de los análisis.
Tabla 4	Clasificación de las aguas por su mineralización.
Tabla 5	Clasificación de las aguas por su pH.
Tabla 6	Clasificación de las aguas por la dureza total.
Tabla 7	Clasificación de las aguas por su Grado de Contaminación Salina.
Tabla 8	Clasificación de las aguas por el Índice de Salinidad Marina.
Tabla 9	Valores del LMA establecido por las normas.
Tabla 10	Relación de la cantidad de parámetros afectados y la cantidad de puntos de muestreo afectados.

INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para mantener la vida y el equilibrio ecológico de nuestro planeta; es indispensable en el mantenimiento de las funciones de los organismos y de los ecosistemas, se utiliza en la producción de alimentos, para cubrir las necesidades de agua potable de las poblaciones humanas, en la higiene personal y la producción industrial y pesquera.

El crecimiento del uso del agua y su escasez debido al cambio climático aumentarán la dependencia de las aguas subterráneas, que constituyen el 99 % del agua dulce de la Tierra. La buena gobernanza del recurso puede ser la solución a las crisis futuras de ese líquido vital. Las aguas subterráneas pueden proporcionar a las sociedades beneficios sociales, económicos y medioambientales, entre los que se cuenta la adaptación al cambio climático.

No obstante, su importancia y potencial, este recurso natural no se comprende lo suficiente, se subestima, se contamina, se gestiona mal y se sobreexplota, estas malas prácticas pueden tener consecuencias irreversibles.

La disponibilidad de las aguas terrestres es afectada también por el nivel de degradación de su calidad, a consecuencia de la contaminación y la salinización de los acuíferos. Esta situación ha traído una serie de impactos que afectan cada vez más a la sociedad, la economía nacional y la estabilidad de nuestro país.

La provincia de Holguín y en particular el sector noroeste del Valle del Cauto ha sido afectada notablemente por la situación climatológica, presentando sequía extrema y severa; por lo que gran parte de sus habitantes carecen del preciado líquido.

Realizar la investigación hidrogeológica en la zona de estudio programada es esencial para el desarrollo sostenible de los territorios que la componen, por cuanto evaluar el recurso agua subterránea y sus características, son vitales para su correcta explotación.

Por tal motivo surge la siguiente investigación titulada: **“Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas del sector noroeste del Valle del Cauto, provincia Holguín”**. El **problema científico** es la necesidad de evaluar la calidad de las aguas subterráneas del sector noroeste del Valle del Cauto, para consumo humano.

Objeto: Las aguas subterráneas del sector noroeste del Valle del Cauto.

Campo de Acción: Hidroquímica y microbiología de las aguas subterráneas del sector noroeste del Valle del Cauto.

Objetivo: Evaluar la calidad de las aguas subterráneas del sector noroeste del Valle del Cauto mediante sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas para consumo humano.

Hipótesis: Si se determinan los focos contaminantes y las propiedades físico-químicas y microbiológicas de las aguas del Valle del Cauto, entonces se podrá evaluar la calidad de las aguas para el consumo de agua a la población.

Objetivos específicos:

- Determinar los focos contaminantes.
- Determinar las propiedades físicas, químicas y microbiológicas de las aguas subterráneas.
- Proponer las áreas con calidad de agua favorables para el consumo humano.
- Proponer las medidas de mitigación.

Aporte Científico:

Se incrementará el conocimiento de las aguas del Valle del Cauto, contando con información actualizada del área, con la cual se podrá realizar un mejor planeamiento de la utilización de los recursos hídricos subterráneos, cada vez más escasos. Además de servir como punto de partida para las futuras investigaciones.

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Para lograr una investigación exitosa y conocer los trabajos realizados en el mundo y en Cuba sobre esta temática es necesario la recopilación de la mayor cantidad de información sobre los estudios más relevantes desarrollados, hipótesis y metodologías establecidas en los últimos años, que permitan actualizar la temática con el objetivo de alcanzar mejores resultados y de conocer aspectos generales sobre los estudios de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales. Es preciso establecer una serie de definiciones indispensables para realizar estudios sobre calidad y contaminación de las aguas, que permite establecer el marco teórico conceptual.

Se tratan algunos conceptos y definiciones que son de importancia conocer para una mejor comprensión del tema que se aborda en la investigación:

Agua potable: Agua que no ofrezca peligro para la salud humana por sus características químicas, físicas, biológicas y radiológicas al ser usada como bebida, en la preparación de alimentos, aseo personal y otras actividades que impliquen el contacto directo del agua con los seres humanos. (NC 827:2017 Agua Potable).

Agua para consumo humano cuyos parámetros físicos, químicos, biológicos y radiológicos están acordes al patrón de potabilidad y no ofrece riesgos para la salud humana. (NC 1021:2014 Higiene comunal).

Fuentes de abastecimiento de agua: Todas las corrientes superficiales, lagos y embalses, así como las aguas subterráneas, que son utilizadas para el suministro de agua de consumo humano o para la elaboración de alimentos. (NC 1021:2014 Higiene comunal).

Fuentes de abastecimiento subterráneas: Aguas provenientes de los mantos subterráneos tanto libres como confinados. (NC 1021:2014 Higiene comunal).

Límite máximo admisible (LMA): Valor establecido para la concentración de un componente o sustancia que garantiza que el agua de consumo humano no representa un riesgo para la salud del consumidor. (NC 827:2017 Agua Potable).

Contaminación del agua: Se define la contaminación del agua como el vertido en ella de productos diversos, de modo que el agua adquiere unas propiedades tóxicas para

los seres que en ella habitan, y se convierte en no apta para el uso a la que la destina el hombre. Generalmente el agua se contamina debido a las actividades humanas. Fernández, M. (2003).

Conductividad eléctrica (C.E.): capacidad del agua para conducir la electricidad, depende del grado de mineralización de las aguas; con el aumento de la mineralización aumenta también la conductividad eléctrica. De Miguel, C. (2012).

Turbidez: se define como la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz se disperse y no se transmita a través de la suspensión. Deloya, A. (2006).

pH: se debe a la composición de los terrenos atravesados por el agua, de tal forma, si tenemos valores del pH alcalino, indica que las rocas son carbonatadas, y un pH ácido, que las rocas son silíceas. De Miguel, C. (2012).

Sulfatos: el ion sulfato (SO_4^{2-}) se forma principalmente mediante la oxidación del sulfuro de hidrógeno en condiciones aerobias. Es uno de los iones que contribuye a la salinidad de las aguas y se encuentra presente en la mayoría de las aguas naturales. De Miguel, C. (2012).

Nitritos: el ion nitrito (NO_2^-) puede estar en el agua bien por la oxidación del amoníaco o por la reducción de los nitratos. En el primer caso, es casi seguro que su presencia se deba a una contaminación reciente, aunque haya desaparecido el amoníaco. En las aguas subterráneas, sobre todo las de origen profundo, se pueden encontrar nitritos como consecuencia de un medio reductor. Igualmente, cuando el agua que contiene nitratos está en contacto con metales fácilmente atacables, ya sea a pH ácido o alcalino, se pueden presentar nitritos. De Miguel, C. (2012).

Cloruros: los contenidos de cloruro en las aguas subterráneas son extremadamente variables y se deben principalmente, a la naturaleza de las rocas por donde circula el agua y existencia o no de mezcla con aguas marinas. El gran inconveniente de los cloruros en las aguas es el sabor desagradable que los mismos le aportan. De Miguel, C. (2012).

Dureza total: está representada por el contenido de sales de calcio o magnesio y se determina por la suma de estos iones expresados en miligramos equivalentes. De Miguel, C. (2012).

Sólidos totales disueltos (STD): los sólidos disueltos totales (STD) comprenden las sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica (MO) que están disueltas en el agua. Los STD presentes en el agua de consumo humano provienen de fuentes naturales, aguas residuales, escorrentía urbana y aguas residuales industriales. Debido a las diferentes solubilidades de diferentes minerales, las concentraciones de STD en el agua varían considerablemente de unas zonas geológicas a otras. OMS, (2006)

Coliformes totales: Bacilos Gram negativos, aerobios o anaerobios facultativos, no esporulados, oxidasa negativos, capaces de crecer en presencia de sales biliares o agentes tensoactivos que fermentan la lactosa con producción de ácido y gas a $(35,0 \pm 0,5)$ °C de 24 h a 48 h y que pueden presentar actividad de la enzima β -galactosidasa. La mayoría de las bacterias del grupo coliforme son de los géneros *Escherichia*, *Citrobacter*, *Klebsiella* y *Enterobacter* pertenecientes a la familia *Enterobacteriaceae*. (NC 827:2017).

Coliformes termotolerantes: Subgrupo de las bacterias del grupo coliforme que fermentan la lactosa a $(44,0 \pm 0,2)$ °C en 24 h con *Escherichia coli* como el principal representante. (NC 827:2017).

Complejo acuífero o hidrogeológico: constituye una estructura litológico-facial y estratigráfica enmarcada dentro de determinado rango de edad geocronológica cuyos límites espaciales pueden ser tectónicos, de contactos litológicos o cambio faciales. Están constituidos por una o varias formaciones litológicas, constituyendo una unidad hidrogeológica. Sus características hidrodinámicas le confieren independencia hidráulica, por tanto, constituye una entidad para la gestión del agua subterránea que encierra. Pérez, C. et al. (2018).

Cuenca: Extensión de terreno más ancha y menos profunda que un valle, cuyas aguas se vierten en un río, en un lago o en el mar.

Cuenca hidrológica: Es una unidad del territorio, diferenciada de otras unidades, normalmente delimitada por un parte aguas o divisoria de las aguas —aquella línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en dicha unidad—, en donde escurre el agua en distintas formas, y ésta se almacena o fluye hasta un punto de salida que puede ser el mar u otro cuerpo receptor interior, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aun sin que desemboquen en el mar. En dicho espacio delimitado por una diversidad topográfica, coexisten los recursos agua, suelo, flora, fauna, otros recursos naturales relacionados con éstos y el medio ambiente. La cuenca hidrológica conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos. La cuenca hidrológica está a su vez integrada por subcuencas y estas últimas están integradas por microcuencas. Resumiendo, la cuenca hidrológica es una cavidad natural en la que se acumula agua de lluvia, circula hacia una corriente principal y finalmente llega a un punto común de salida separada de otras cuencas por parte aguas más elevados. Pérez, C. et al. (2020).

Cuenca hidrogeológica: Es una depresión geológica estructural, capaz de almacenar permanente o temporalmente agua subterránea y de conducirla con mayor o menor conductividad hidráulica hacia una zona de descarga que puede ser río, lago o hacia el mar o de retenerla dentro de fronteras impermeables. Esta puede tener centenares y hasta algunos miles de kilómetros cuadrados de extensión, pudiendo estar formado por uno o varios acuíferos. Los límites de una cuenca son parteaguas elevados estructuralmente, donde, el movimiento del agua es hacia las partes bajas en forma plano-estructural inclinada o en forma centrípeta. Las cuencas hidrogeológicas, pueden ser vecinas unas de otras en el plano horizontal o estar encima una de otras con un cierto por ciento de solape. Pérez, C. et al. (2020).

Subcuenca, zona o sector hidrogeológico: Es una unidad hidrogeológica menor a la cuenca o macizo hidrogeológico, que puede tener o no límites geológicos o hidráulicos, que en extensión pueden tener desde algunas decenas hasta centenares de kilómetros cuadrados de superficie y que posee un estudio más o menos detallado de laboreos, aforos y cálculo de reservas, donde éstos se encuentran en la categoría de medidos (Categoría II) o probados (Categoría I). Pérez, C. et al. (2020).

Tramo hidrogeológico: es el área definido por los investigadores, por lo general menor de 100 km², que se caracteriza por el mayor estudio realizado con perforaciones, afloros, quimismo y vulnerabilidad, pudiendo ser parte de una cuenca hidrogeológica, un macizo hidrogeológico, una región hidrogeológica, una subcuenca, una zona o sector hidrogeológico, y que abastece a una ciudad u objetivos económicos, siendo sus fronteras por lo general abiertas y que, por su alto grado de estudio, los recursos y reservas se encuentran siempre en la categoría de probados (Categoría I). (Pérez, C. et al. (2020).

Trabajos realizados en el Mundo y Cuba sobre el análisis de calidad de las aguas

Autores plantean que la composición química de las aguas representa un reflejo de las condiciones naturales históricas definidas por todo un complejo de procesos ocurridos en la atmósfera, la superficie terrestre y en la hidrosfera subterránea.

Como fundamento para estos estudios se encuentran las investigaciones realizadas por Emariote, Ehalley y P Perrault, expresando en el libro sobre el origen de los manantiales en 1674 en Francia, en el cual por primera vez de forma cuantitativa se estableció el ciclo hidrológico de la naturaleza.

Contribuciones europeas del siglo XIX dieron énfasis a la hidráulica del aprovechamiento del agua subterránea, los principales investigadores en este aspecto fueron: J. Boussinesq, G. A. Daubres, J. Dupuit, P. Forchheimer y A. Thiem. En el siglo XX investigadores franceses, rusos, norteamericanos y de otros países establecieron tratados válidos sobre las aguas subterráneas, con lo que se logró el conocimiento actual de las distintas temáticas de la Hidrogeología, aunque existen aspectos aún poco estudiados, como la relación de las condiciones hidrogeológicas con los procesos de salinización y desertificación de suelos y otros relacionados con el medio ambiente.

Por la importancia que requiere el tema en el mundo se han realizado innumerables estudios referentes al tema de la calidad de las aguas, algunos de estos se reflejan a continuación:

Khare, P. (2017) evalúa la calidad del agua subterránea en seis distritos principales de Madhya Pradesh en el centro de la India. Este trabajo proporcionó un impulso al gobierno estatal para desarrollar soluciones innovadoras con el fin de mejorar la calidad

del agua subterránea en estas áreas. Para que este estudio fuese más completo le faltó evaluar otros parámetros que son necesarios en la calidad del agua como el contenido de calcio, magnesio, sodio, potasio, materia orgánica, y otros.

Jiménez, T., & Rodríguez, D. (2018) realizaron la investigación Análisis del uso y manejo del agua subterránea en la región caribe colombiana, para conocer el estado actual de su aprovechamiento y las buenas prácticas que se le da al recurso en esta región, así como mostrar el camino que se debe tomar para implementar acciones referentes, que contribuyan al buen manejo del recurso hídrico.

Asghari, B., et al. (2018) el objetivo de este estudio fue monitorear las características físicas y químicas de las aguas subterráneas en la ciudad de Zanjan, Irán. Los resultados muestran que el agua en el área de estudio basado en los estándares de la OMS, es adecuada para beber. En esta investigación no se realizaron análisis microbiológicos, lo cual puede influir en la calidad del agua y su clasificación.

Liu, L., et al (2022), describió la distribución espacial de fluoruro (F) y manganeso (Mn) en el agua subterránea y se evaluó la calidad general del agua subterránea con el índice de calidad del agua de peso de entropía (EWQI) en la llanura de Weining Plain, noroeste de China. Los resultados muestran que 50 muestras de agua subterránea (un total de 144) pertenecen a calidad pobre y muy mala debido a las actividades agrícolas, el desarrollo industrial y las condiciones hidrogeológicas locales.

Ogarekpe, N. M., et al. (2023) realizaron un estudio para determinar la variabilidad espacial de las características físicas y químicas. Los metales pesados constituyentes del agua subterránea dentro de Calabar Metropolis, así como el riesgo potencial para la salud humana de adultos y niños debido a los metales pesados a través de la ingestión y las vías dérmicas.

Cuba no ha sido la excepción de estos estudios, donde los primeros pasos fueron en la década de los años 60. Con la ayuda y la cooperación brindada por los especialistas soviéticos y búlgaros, así como por el personal cubano se creó el Mapa Hidrogeológico de Cuba a escala 1:1 000 000 en 1965. En el año 1970, la Academia de Ciencias de Cuba, se conforma el Mapa Hidrogeológico de Cuba a escala 1:1 500 000. En los años posteriores se confeccionó el Mapa de la División Esquemática de las Cuencas

Yarisleydis Rodríguez Hechavarría

Hidrogeológicas a escala 1:500 000, el mismo contenía la actualización de las cuencas subterráneas por la categoría de estudio realizado en las mismas, composición litológica, red de puntos de observación, hidroisohipsas, entre otros tópicos, brindó la posibilidad de conocer el estado real del estudio de las distintas cuencas. A finales de 1990 y con la finalidad de integrar toda la información hidrogeológica recopilada e incorporarle alguna adicional que no fue analizada por el mismo, se creó un grupo de trabajo para la confección del Mapa Hidrogeológico de Cuba a escala 1:250 000; se fueron desarrollando múltiples investigaciones que fueron aportando conocimientos sobre las características hídricas de nuestro país.

Debido al cambio climático y la escasez de agua potable en los últimos años la temática de la calidad de las aguas subterráneas ha sido objeto de estudio y prioridad para el país. El área del Valle del Cauto por pertenecer a una de las principales cuencas hidrográficas de Cuba se ha estudiado en innumerables ocasiones.

Se han realizado estudios hidrogeológicos, de salinización, quimismo de las aguas, vulnerabilidad, focos contaminantes, cálculos de recursos, estratigráficos, entre otros, dentro de los que se encuentran los siguientes:

- Factores hidrogeológicos que influyen en la salinidad de los suelos. Ejemplo de estudio Valle del Cauto provincia Holguín. 2011.
- Estudio de salinización de la Cuenca Maceo-San Germán. I Etapa. 2011.
- Caracterización hidrogeológica del Valle del Cauto, Cuba. 2013.
- Investigación hidrogeológica del municipio Calixto García. I Etapa. 2015.
- Investigación Hidrogeológica del Municipio Calixto García. II Etapa. 2016.
- Investigación Hidrogeológica del Municipio Calixto García. III Etapa. 2017.
- Estudio de salinización de la Cuenca Maceo-San Germán. III Etapa. 2018.
- Mapa Hidrogeológico a escala 1:100 000 de la hoja cartográfica 4978 Holguín. 2018.
- Investigación Hidrogeológica de Aguas Profundas en Maceo-Cristino-Cacocum. Etapa I. 2019.

- Investigación Hidrogeológica Cálculo de Recursos y Reservas. Zona Hidrogeológica Los Arroyos. Etapa I. 2020.
- Mapa hidrogeológico a escala 1:100 000 de la hoja cartográfica 4977 San Germán. 2020.
- Investigación Hidrogeológica de Aguas Profundas Maceo-Cristino-Cacocum. Etapa II. 2020.
- Investigación Hidrogeológica de la Salinización Fósil en la Afectación de las Aguas y Suelos de la Cuenca Maceo-San Germán. 2020.
- Investigación Hidrogeológica Cálculo de Recursos y Reservas. Zona Hidrogeológica Los Arroyos. Etapa II. 2021.
- Mapa Hidrogeológico a escala 1:100 000 de la hoja cartográfica 4878 Tunas. 2021.
- Investigación Hidrogeológica de Aguas Profundas Maceo-Cristino-Cacocum. Etapa III. 2021.

Todos los artículos y trabajos consultados, tanto nacionales como internacionales, sirvieron de base para esta investigación.

CAPÍTULO I - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-GEOGRÁFICAS Y GEOLÓGICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

1.1 Introducción

En el presente capítulo se describen las principales características físico-geográficas, geológicas, geomorfológicas, tectónicas, hidrogeológicas y climáticas del área de estudio.

1.2 Características físico-geográficas

1.2.1 Ubicación geográfica

El área de estudio se encuentra situada en la provincia Holguín, en los municipios Urbano Noris, Báguanos, Cacocum, Holguín y Calixto García (Figura 1). Se ubica entre las siguientes coordenadas en el sistema de proyección cónica de Lambert Cuba Sur (Tabla 1).

Tabla 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

Vértices	X: Este	Y: Norte
1	510 600,62	236 346,17
2	555 255,04	251 421,26
3	574 199,40	194 286,70
4	587 947,92	208 848,91

El área de estudio se encuentra comprendida por las hojas cartográficas Tranquera, Buenaventura, Holguín, Alcalá, Mir, Cacocum, Báguano, San Germán, El Caserío y Cauto Cristo, a escala 1:50 000.

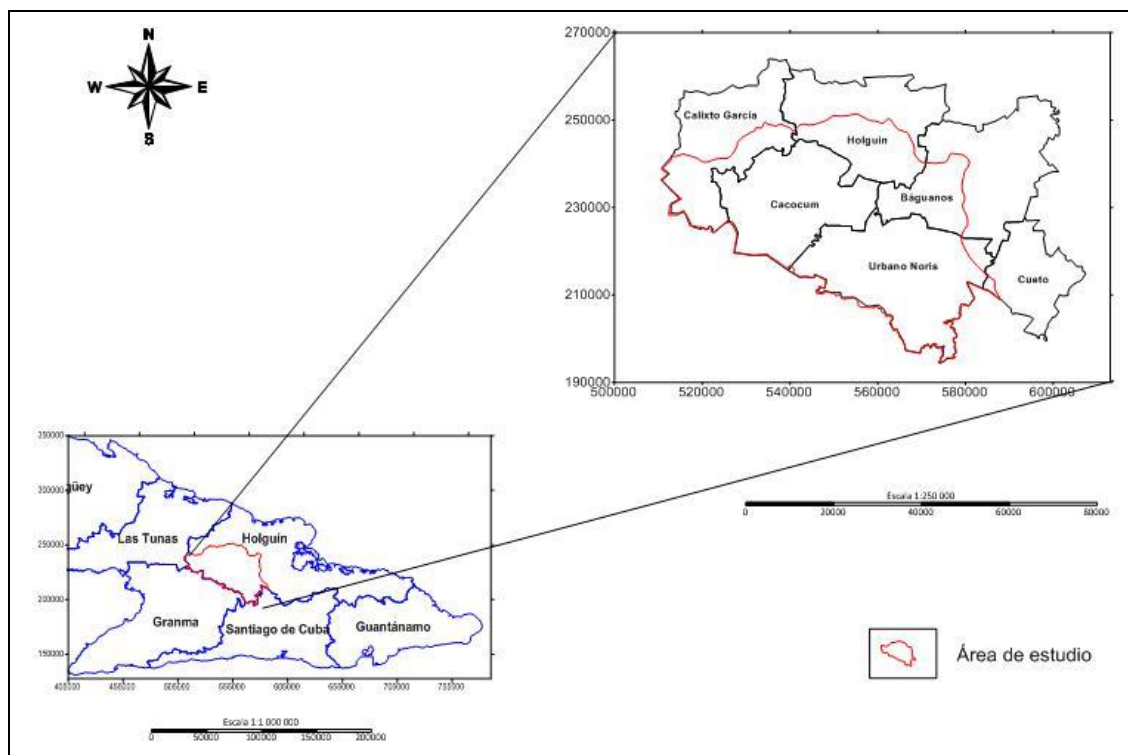


Figura 1 Ubicación geográfica del área de estudio.

1.2.2 Clima, hidrología y relieve

El clima es tropical con la alternancia en el año de un período seco y otro lluvioso. La temperatura media anual del aire es de (25 a 26) °. La precipitación anual (1 200 a 1 400) mm. La dirección predominante de los vientos es del este y noreste.

La vegetación es monótona. En las zonas elevadas son matorrales de marabú y aroma. Las llanuras generalmente están cultivadas, tienen plantaciones de caña de azúcar y cítricos.

El sistema fluvial es moderadamente ramificado tipo dendrítico predominantemente. Los principales ríos son: Cauto, Holguín, Colorado, Mayabe, La Rioja, así como una serie de afluentes de éstos y arroyos intermitentes. Las presas más grandes son: Güirabo y Bio. Existen otros embalses relativamente importantes, como: Limoncito, Magueyal, Piti Fajardo, Santa Teresa y Mayabe. (Figura 2)

La zona 3, de peligro sísmico moderado, que puede ocasionar daños en las construcciones debiéndose tomar medidas sismorresistentes en todas las estructuras y obras en función de la categoría ocupacional de las mismas y el nivel de protección definido según la probabilidad de exceder un sismo de diseño. Los valores de la aceleración espectral horizontal máxima para el cálculo (S_a) estarán entre (0,40 y 0,50) g para periodos cortos (S_s) y entre (0,15 y 0,20) g para periodos largos (S_1). A ella pertenecen los municipios Báguano y Urbano Noris.

Tabla 2. Comportamiento de la sismicidad y sus componentes por municipios.

No.	Provincia	Municipio	Código Municipal	S_0 (g)	S_s (g)	S_1 (g)	T_L (s)	Zona
127	Holguín	Báguano	1105	0,211	0,406	0,149	9,0	3
128	Holguín	Holguín	1106	0,181	0,349	0,128	9,0	2
129	Holguín	Calixto García	1107	0,185	0,346	0,123	9,0	2
130	Holguín	Cacocum	1108	0,211	0,400	0,141	9,0	2
131	Holguín	Urbano Noris	1109	0,256	0,474	0,168	8,0	3

1.2.4 Características socioeconómicas del área de estudio.

La industria está desarrollada en la ciudad de Holguín. Las fábricas más importantes son: Combinadas KTP-1, Implementos Agrícolas, Poligráfico, Materiales de Construcción y Cerveza Bucanero SA. Relativamente desarrollada está la industria ligera, la industria química y la goma. La industria alimenticia tiene varias entidades como el Combinado Lácteo, Combinado Cárnico, varias dulcerías y panaderías. Existen centrales azucareros en los poblados de Báguano, San Germán y Cristino Naranjo. Existió un central en Maceo, que está desactivado.

La red de comunicación vial está relativamente desarrollada, el área a investigar está atravesada por la carretera central que atraviesa los municipios Calixto García, Holguín y Cacocum. Existen también diversas carreteras que salen radialmente de la ciudad capital provincial enlazándola con Mayarí, Guardalavaca, San Germán, San Andrés y Gibara. Desde la ciudad capital y a su alrededor también existen numerosos caminos que llegan hasta los más diversos barrios rurales y se comunican entre ellos,

generalmente son transitables en época de seca, en época de lluvia algunos se vuelven intransitables. Al noroeste, desde la carretera Central sale una carretera en el barrio denominado Cruce de Maceo y llega hasta el poblado homónimo, recientemente reparada y en excelente estado técnico.

1.3 Características geológicas e hidrogeológicas

1.3.1 Estratigrafía

La geología del área de estudio es muy variada presentando varias formaciones en su composición. Para su estudio se tomo como base el Mapa Geológico de Cuba a escala 1:100 000 del IGP (Figura 17) y su actualización en el Mapa Hidrogeológico de Cuba a escala 1:100 000, que se encuentra en edición (Figura 3). Para la descripción de las formaciones prentes se tomo como referencia el Léxico Léxico Estratigráfico de Cuba IGP. (2013).

Según los mapas hidrogeológicos de las hojas cartográficas San Germán, Holguín y Tunas a escala 1:100 000 (aprobados por el IGP) en el territorio estudiado, existen las siguientes formaciones:

Peridotitas serpentinizadas y serpentinitas (s)

Distribución geográfica: Afloran en el noreste de la región de estudio en forma de bandas escamadas o corrimientos de ángulos desde abrupto a suaves, intercaladas con rocas del arco de islas Cretácico y de sus cuencas superpuestas. Litología: Serpentinitas foliadas y brechosas con mezclas de un melange ofiolítico con rocas volcánicas del arco Cretácico, pueden aparecer peridotitas con diferente grado de serpentización. Cuando los bloques del arco de islas Cretácico imbuidos dentro de este melange son mapeables a la escala del mapa, se tratan como la formación correspondiente. Relaciones estratigráficas: Casi todos sus contactos son tectónicos con las rocas pre-oligocenas, pudiendo encontrarse discordante sobre estas las rocas del arco Terciario representadas por la Formación Vigía, mientras que las secuencias neoplatafórmicas pueden aparecer discordantes sobre éstas, aunque también en contacto tectónico. Edad: Jurásico Superior (Tithoniano) a Cretácico Inferior (Barremiano). Espesor: Más de 500,0 m.

Gabroides (g)

Yarisleydis Rodríguez Hechavarría

Distribución geográfica: El mayor afloramiento de estas rocas es donde se asienta la ciudad de Holguín desde las estribaciones de la loma El Fraile extendiéndose hacia el este hasta San Rafael; también existe un afloramiento grande al norte de la presa Güirabo entre El Coco, Cifuentes y Edecio Pérez. Al norte de la ciudad de Holguín también hay afloramientos de gabroides mezclados con serpentinitas foliadas entre el reparto Alcides Pino, Los Camarones y San Miguel. Litología: Gabros de diferentes tipos hasta microgabros, gabro-diabasas y diabasas. Se alternan los gabros anfibólicos y piroxénicos de color gris y estructura irregular con dunitas, wehrlitas, lherzolitas y piroxenitas serpentinizadas de granos muy finos del mismo color, peridotitas de color negro a verdoso con hornblenda de color gris oscuro-negruzco, todas las litologías pertenecientes al complejo cumulativo de la asociación ofiolítica, empaquetados tectónicamente y engrosados con todos sus límites tectónicos, pudiendo aparecer estas bandas muy tectonizadas subhorizontalmente con tectonitas mezcladas de todas las litologías mencionadas y hasta milonitas. Descripción generalizada a partir de los datos aportados por el pozo PC-245 realizado por los investigadores de la Brigada Cubano-Húngara (Pentelényi, 1990), de 503,80 m de profundidad. Edad: Jurásico Superior (Tithoniano) a Cretácico Inferior (Barremiano). Espesor: Más de 500,0 m.

Granitoides (granodioritas, dioritas y granitos) (gd)

Distribución geográfica: Aparecen en el cuerpo intrusivo que se extiende desde la ciudad de Camagüey hasta la ciudad de Tunas, es una de las más grandes intrusiones de la isla de Cuba y corresponden en el territorio de la antigua provincia de Oriente unos 500 km². La parte más oriental de esa intrusión aflora en las cercanías de Buenaventura. En el norte, está cubierta por los sedimentos del Mioceno Medio, y en el este y al sur, está limitada por una zona de metamorfismo de contacto, con las rocas vulcano-sedimentarias de la Formación Buenaventura. La superficie de este cuerpo casi siempre está fuertemente alterada, desintegrada a causa de la transvaporización de contacto que posteriormente está acrecentada por el intemperismo superficial. Así se forman las areniscas y suelos arenáceos.

Andesitas (a)

Existen pequeños cuerpos alargados de esta roca, alineados de sur a norte al oeste y suroeste, próximos al poblado de Buenaventura. También se encuentran en pequeños cuerpos dentro de la Formación Crucero Contra maestre.

Formación Crucero Contra maestre (cct)

Distribución geográfica: Se desarrolla en la parte noroeste del área de estudio, no siendo muy amplia su distribución. Litología: areniscas, tefroides, conglomerados, gravelitas, tobas, tufitas limolíticas, calizas silicificadas, silicitas gris carmelitosas, lavobrechas, andesitas, basaltos y basalto-andesitas. Relaciones estratigráficas: su subyacente se desconoce. Está cubierta discordantemente por la Formación Camazán. Edad: Cretácico Superior (Turoniano a Campaniano). Ambiente de sedimentación: Talud continental o insular. Ambiente marino. Ambiente tectónico: basamento deformado Mesozoico. Arcos volcánicos del Cretácico. Arco volcánico Albiano a Campaniano. Espesor: oscila entre (8 000,00 y 13 500,00) m.

Formación Lindero (ldr)

Distribución geográfica: Se desarrolla al noroeste de la región y este, cerca del poblado Santa Rita, en forma de parches aislados no muy extensos. Litología: Calizas bien estratificadas, generalmente silicificadas, compactas yaporcelanadas, con colores grises, verdosos y rosáceos. Relaciones estratigráficas: Está cubierta discordantemente por la Formación Vigía. Edad: Cretácico Superior (Campaniano a Maestrichtiano). Ambiente de sedimentación: Se depositó en una cuenca marina de aguas profundas. Ambiente tectónico: Basamento deformado Mesozoico. Cuenas sinorogénicas postvolcánicas del Cretácico Superior al Daniano Inferior. Espesor: Menos de 100,00 m.

Formación La Jíquima (lj)

Distribución geográfica: Se desarrolla en forma de bandas alargadas de dirección oeste-este en el centro norte de la región de estudio con concavidad al nivel de la ciudad de Holguín, donde aflora al sur de ésta y se extiende desde los poblados de La Ceiba, Yareyal y Mayabe. Litología: Presencia de semiciclos donde las rocas transicionan gradualmente de granulometría gruesa a fina. Está representada por conglomerados polimícticos, areniscas, limolitas, lutitas, margas y calizas arcillosas, las cuales se repiten rítmicamente en el corte de la unidad. Aunque puede haber ausencia

Yarisleydis Rodríguez Hechavarría

de algunas de estas litologías, en ocasiones los paquetes de conglomerados pueden observarse de forma aislada. La estratificación puede ser desde muy gruesa y masiva, a media y fina, por lo que en esta unidad están presentes los flysch de tipo proximal, medial y distal. Las areniscas son del tipo vulcanomícticas, bien estratificadas, de grano fino a medio con intercalaciones de aleurolitas y argilitas bien estratificadas, a veces carbonatadas. El espesor de las capas de areniscas es variable de (1,00 a 2,00) cm hasta (30,00 a 40,00) cm y en ellas muchas veces se observa una estratificación gradacional. Relaciones estratigráficas: Está cubierta discordantemente por las formaciones Camazán, Vigía y el olistostroma Haticos. Edad: Cretácico Superior (Campaniano a Maestrichtiano). Ambiente de sedimentación: Se depositó en aguas de mediana profundidad, en un medio reductor que posibilitó la conservación de restos de plantas carbonizadas. Ambiente tectónico: Basamento deformado Mesozoico. Cuencas sinorogénicas postvolcánicas del Cretácico Superior al Daniano Inferior. Espesor: 300,00 m.

Olistostroma Haticos (unidad informal) (ht)

Distribución geográfica: Se distribuye en forma de parches alargados en todo el centro norte de la región de estudio, de oeste a este, estando su mayor afloramiento al sur y sureste de la ciudad de Holguín. Litología: Secuencia olistostrómica constituida, en su mayor parte, por bloques de serpentinitas, gabros, microgabros, gabro-diabasas, diabasas, granodioritas, jasperoides y rocas magmáticas y tufogénicas en general. El tamaño de los bloques y fragmentos oscila entre algunos centímetros hasta 4.00 m. La matriz es vulcanomíctica o tufogénica de areniscas y aleurolitas, presentándose intercalaciones de tobas, con fragmentos aislados de similar composición que el resto de la secuencia. Forma brechas y conglomerados polimícticos. El tamaño de los olistolitos es variable, van desde algunos centímetros hasta algunos metros llegando hasta centenares de metros y los mismos son de ultramafitas serpentinizadas, gabros, gabro-diabasas, granodioritas, cuarcitas, calizas, areniscas, aleurolitas, basaltos, andesito-basaltos, tufitas y granodioritas.

La parte superior de esta unidad está constituida por conglomerados y brechas tobáceas con intercalaciones de tobas riodacíticas o dacíticas, las cuales cuando

transicionan a los conglomerados contienen fragmentos de éstos y en la parte más alta del corte se encuentran los olistolitos más grandes de granodioritas que pueden ser confundidos como cuerpos intrusivos, observado esto en la Loma del Muerto en la carretera que va de San Agustín a Buenaventura. Relaciones estratigráficas: Yace discordantemente sobre las formaciones Crucero Contramaestre y La Jíquima. Está cubierta discordantemente por la Formación Vigía, así como con la Formación Camazán, parte indiferenciada, y su Miembro Pedernales. Edad: Paleoceno Superior. Ambiente de sedimentación: Talud continental o insular. Ambiente marino. Ambiente tectónico: Basamento deformado Cenozoico. Cuencas sinorogénicas postvolcánicas paleogénicas (cuencas a cuesta o piggy back). Espesor: Entre (200,00 y 800,00) m.

Formación Vigía (vg)

Distribución geográfica: Aflora en forma de franjas alargadas, discontinuas, al sur y al este del macizo serpentinitico de la provincia Holguín, en forma de franjas alargadas de oeste a este en la parte sur de la región de estudio. Litología: Intercalaciones de areniscas polimícticas de granos gruesos, y de medianos a finos; limonitas, calizas arcillosas y margas de color verde grisáceo, dispuestas en capas de (3,00 a 5,00) cm de espesor. Más arriba, en la secuencia, aparecen tobas riodacíticas blancas y grises, así como tufitas intercaladas con margas y calizas arcillosas. Las areniscas están bien estratificadas. En algunas capas se encuentran foraminíferos grandes. Las tobas riodacíticas son generalmente vitrocrystaloclasticas, a veces pumíticas, en ocasiones carbonatadas, porosas, de color blanco, blanco-grisáceo. Las tufitas están frecuentemente silicificadas, carbonatadas o bentonizadas, bien estratificadas y en ocasiones plegadas y fracturadas. Entre las tobas riodacíticas, tufitas y areniscas se encuentran en ocasiones capas finas de diatomitas. Relaciones estratigráficas: Yace discordantemente sobre las formaciones La Jíquima, Lindero y la unidad informal olistostroma Haticos. Está cubierta discordantemente por las formaciones Charco Redondo, Camazán y su Miembro Pedernales. Edad: Paleoceno Superior a Eoceno Medio. Ambiente de sedimentación: Plataforma. Ambiente marino. Ambiente tectónico: Basamento deformado Cenozoico. Arco volcánico del Paleógeno. Espesor: Oscila entre (200,00 y 300,00) m.

Formación Charco Redondo (chr)

Distribución geográfica: Se desarrolla al suroeste entre las localidades de Virginia, La Calera y Flora, además también se observa en pequeños parches en la ribera sur del río Cauto cerca de Viuda Cinco. Litología: Calizas compactas organodetríticas, fosilíferas, de color variable, predominando los tonos blancos a grises verdosos. En la parte inferior del corte, son frecuentes las brechas, donde predomina la estratificación gruesa, mientras que en la parte superior predomina la estratificación fina. Relaciones estratigráficas: Yace discordantemente sobre la Formación Vigía. Está cubierta discordantemente por la Formación Camazán y su Miembro Pedernales. Edad: Eoceno Medio. Ambiente de sedimentación: Plataforma. Ambiente marino. Ambiente tectónico: Basamento deformado Cenozoico. Arco volcánico del Paleógeno. Espesor: Oscila entre (50,00 y 200,00) m.

Miembro Pedernales (Formación Camazán) (pd)

Distribución geográfica: Se desarrolla como una faja discontinua al sur y al este de la ciudad de Holguín en El Yayal y en parches distribuidos irregularmente desde Manantiales, Guaramanao, pasando por el sur de la ciudad de Holguín, Los Haticos y Ceuta. Aflora en parches al sur de San Germán, a 2,00 km al oeste de La Pedrera y a unos 500,00 m al sur de Papi Lastre. Litología: Conglomerado polimítico, débilmente cementado constituido principalmente por clastos de diabasas, gabros y ultramafitas, moderadamente redondeados y seleccionados, con un tamaño frecuente de (4,00 a 7,00) cm. Son masivos o con estratificación lenticular, ocasionalmente cruzada. La matriz contiene en algunos cortes grandes de lepidocyclinas. La coloración es oscura, grisácea, abigarrada. Relaciones estratigráficas: yace discordantemente sobre las formaciones Crucero Contramaestre, Charco Redondo, Vigía y el olistostroma Haticos. Está cubierto concordantemente por la parte indiferenciada de la Formación Camazán a la que pertenece. Edad: Oligoceno Superior a Mioceno Inferior. Ambiente de sedimentación: Delta. Ambiente transicional. Ambiente tectónico: Cobertura post-orogénica. Espesor: Aproximadamente 150,00 m.

Formación Camazán (cz)

Distribución geográfica: Se desarrolla como una faja continua por toda la parte centro-sur de la región y de forma intermitente en parches, girando hacia el sur en la parte este sirviendo de divisoria entre las cuencas Cauto y Nipe, entre las localidades de La Caridad-Las Calabazas-Dobales, pasando por Cuatro Caminos, Certeneja de Güirabo-Dos Hermanas por el sur de la ciudad de Holguín hasta Camazán (localidad tipo)-Loma La Gloria-El Manguito-hacia Tacajó por el norte y por Rejondones de Báguano-Tacamara hasta El Mijial al sureste, también por La Cuchilla y hasta San Germán. Litología: Calizas coralino-algáceas (biolitas), calizas biodetríticas, a veces arcillosas, formando capas de (15,00 a 30,00) cm de espesor, con macroforaminíferos apreciables a simple vista; calcarenitas, calciruditas, limolitas calcáreas, con intercalaciones de margas y arcillas, ocasionalmente yesíferas. Coloración variable, amarillo, crema, marrón y gris. Se desarrolla en ellas el carso tanto superficial como subterráneo, constituyendo la principal secuencia acuífera de la región. Relaciones estratigráficas: Yace discordantemente sobre las formaciones Iberia, La Jíquima, Vigía, el olistostroma Haticos y las rocas magmáticas. Está cubierta concordantemente por la Formación Río Jagüeyes y discordantemente por la Formación Cauto. Edad: Oligoceno Superior a Mioceno Inferior. Ambiente de sedimentación: Plataforma. Ambiente marino. Ambiente tectónico: Cobertura post-orogénica. Espesor: Oscila entre (440,00 y 800,00) m, según datos de pozos.

Bloques de la Formación Camazán redepositados (czR)

Los resultados de la geofísica, descripciones de perforaciones y de la paleontología, indican que a unos 4 km al norte de El Manguito, existe una línea supuesta que marca el límite entre la Formación Camazán in situ y los megaolistolitos al sur de esa línea y que están imbuidos dentro de las arcillas de la Formación Río Jagüeyes. En la actualidad un fenómeno similar está ocurriendo al norte del Golfo de México en el talud continental a más de 2 000,00 m de profundidad, donde se deslizan megaolistolitos de casi 8,00 km de largo por 5,00 km de ancho. Estas apreciaciones además de basarse en los resultados de la geoelectricidad, se han fundamentado también en las observaciones de campo donde las calizas y otras rocas carbonatadas que se han mapeado como pertenecientes a la Formación Camazán no están recrystalizadas ni se observan los fósiles como los característicos de dicha formación. También se realizaron

Yarisleydis Rodríguez Hechavarría

diecinueve (19) análisis paleontológicos en el laboratorio del IGP que confirman la edad de la Formación Paso Real donde antes se había mapeado la Formación Camazán.

Formación Río Jagüeyes carbonatada (rjc)

Distribución geográfica: Se desarrolla como una faja continua en forma de U desde la parte centro-oeste de la región hasta el centro-sur de ésta, desde los poblados Pascué-Maceo-Cristino-Cacocum, pasando por Dos Hermanas-Santa Cruz-Tacamara Cuatro-Rey Dos, Bio Paso y hasta Marcané. Litología: Son característicos en ella los cambios litológicos abruptos tanto vertical como lateralmente. Predominan las alternancias de calizas y margas. Las calizas son arcillosas, biodetríticas arcillosas y más subordinadamente calizas biohémicas, calizas dolomitizadas, dolomitas y calcarenitas. Las margas, al igual que las calizas son fosilíferas. Aparecen intercalaciones de areniscas y aleurolitas calcáreas y arcillas (principalmente esmectita). Pueden aparecer conglomerados polimícticos de matriz margosa muy fosilíferos. La estratificación está enmarcada por los cambios litológicos y es frecuentemente lenticular. Colores crema, blancuzco y grisáceo en los horizontes carbonáticos y grisáceo y verdoso en los terrígenos. Relaciones estratigráficas: En la región de estudio, en parte se correlaciona lateralmente con la Formación Camazán según el léxico estratigráfico yace sobre ella de forma discordante la Formación Cauto al sur de la región. Edad: Oligoceno Superior a Mioceno Medio parte baja. Ambiente de sedimentación: Se depositó en un ambiente sublitoral limitado y en áreas lagunares de circulación restringida, señaladas éstas por la asociación Ammonia-Ostrácodos y la presencia de yeso, halita, piritita y lignito en sedimentos arcillosos. Ambiente tectónico: Neoautóctono o Neoplatforma. Espesor: Oscila entre (30,00 y 1 365,00) m.

Formación Río Jagüeyes (rj)

Distribución geográfica: Se desarrolla al sureste de la región de estudio al este de Báguano, entre La Trocha, Unión Siete y Báguano Cinco, bordeando a la bahía de Nipe fuera de la región estudiada. Litología: Arcillas y limolitas pueden ser yesíferas. Predominan los colores crema amarillento, grisáceo y marrón. Limolitas, areniscas, gravelitas polimícticas de matriz arenácea a arcillosa, con cemento carbonático escaso o ausente y margas arcillosas y arenáceas, fosilíferas, alternando con calizas

biodetríticas, calizas biohérticas, calcarenitas y arcillas. Relaciones estratigráficas: Yace concordantemente sobre la Formación Camazán y discordantemente sobre las formaciones Bitirí y Vigía. Está cubierta discordantemente por la Formación Cauto. Edad: Mioceno Inferior parte alta a Mioceno Superior parte baja. Ambiente de sedimentación: Abarca un complejo facial que va desde cuenca restringida hasta la zona sublitoral, incluyendo su borde. Ambiente tectónico: Neoautóctono o Neoplatáforma. Espesor: 150,00 m.

Formación Cauto (ca)

Distribución geográfica: Aflora al sur y suroeste de la región entre los poblados de Santa Inés-Los Corrales-Altagracia-Estrada hasta San Bartolo. Litología: Arcillas, limos, arenas, gravas polimícticas y conglomerados polimícticos, con estratificación horizontal y cruzada, predominando la horizontal. Coloración gris, gris pardusco y amarillo grisáceo. Relaciones estratigráficas: Yace discordantemente sobre las formaciones Camazán y Río Jagüeyes. Está cubierta concordantemente por los sedimentos aluviales del Holoceno. Edad: Pleistoceno Superior. Ambiente de sedimentación: Llanura aluvial. Ambiente continental. Ambiente tectónico: Cobertura post-orogénica. Espesor: Puede alcanzar los 25,00 m.

Depósitos aluviales (al)

Distribución geográfica: Aflora en las riberas erosivas de los ríos Cauto y Contramaestre en zonas de subsidencia relativa. Litología: Arenas de diferentes granulometrías de finas a gruesas, gravas, y cantos redondeados a subredondeados, todos polimícticos, con intercalaciones de horizontes arcillosos subordinadamente y de limos. La separación con respecto a la Formación Cauto solo es posible realizarla por criterios geomorfológicos digitales al analizar el MDT con exageración vertical combinado con fotos satelitales. Yace discordantemente sobre los depósitos semejantes por su origen, pero más antiguos de la Formación Cauto. Edad: Holoceno. Ambiente de sedimentación: Se depositó en un medio aluvial, aunque en dirección a la desembocadura del río Cauto va aumentando su influencia marina. Espesor: Puede alcanzar los 10,00 m o más.

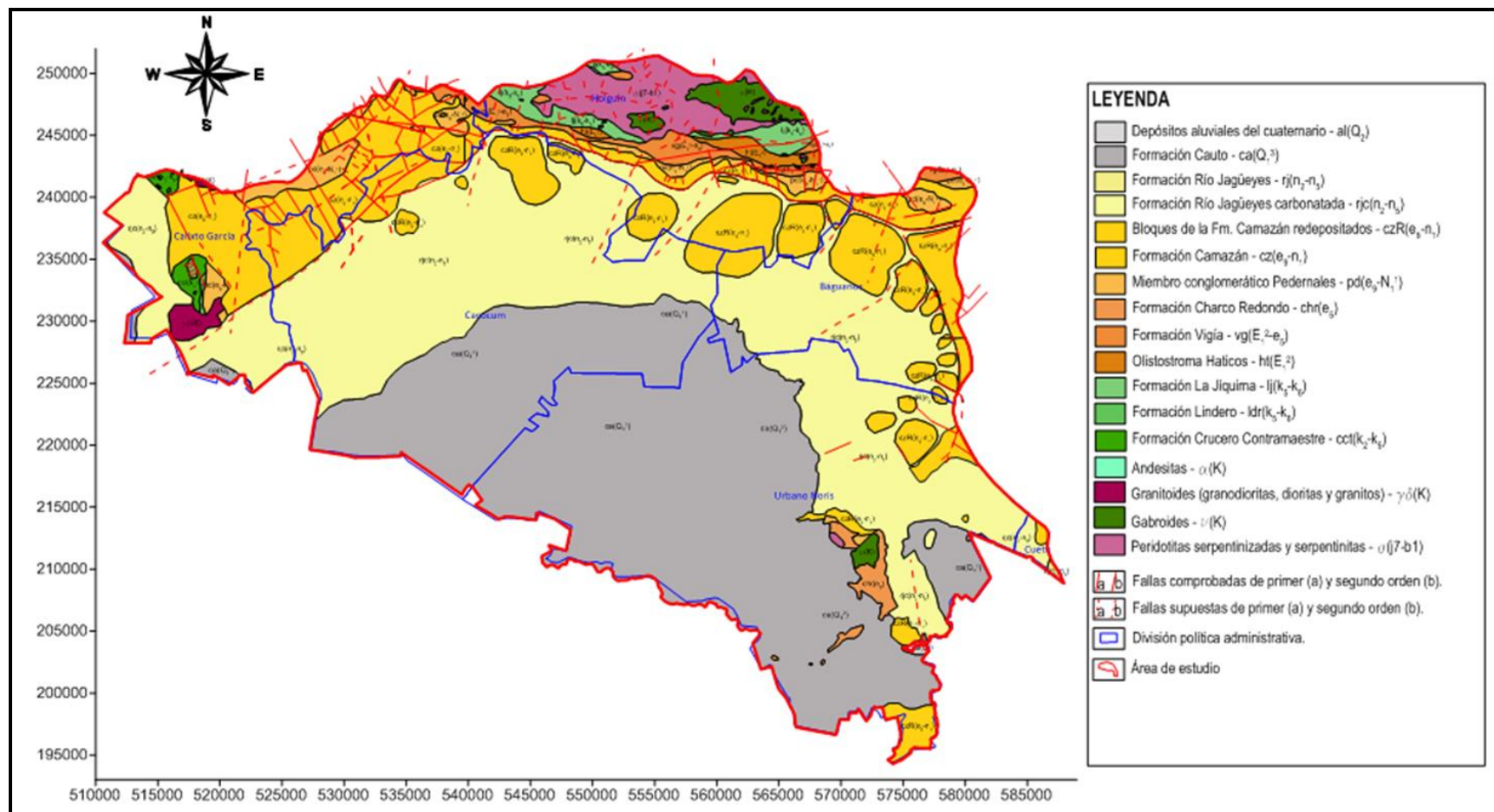


Figura 3. Esquema geológico del área de estudio. Escala 1:250 000 (Tomado del Mapa hidrogeológico de Cuba. Escala 1:100 000; en edición).

1.3.2 Hidrogeología

Según la sistemática hidrogeológica de la provincia Holguín, GEARH. (2000), el territorio de estudio se ubica dentro de la Cuenca Cauto, en la **región** Cauto, abarcando los **tramos** hidrogeológicos Maceo-Cacocum, Cauto y Felicia; y éstos a su vez se componen por las **zonas** Los Arroyos, Cabezuela, Mir La Yolanda, Cristino-Cacocum, Holguín, Pedernales, Certeneja, Felicia I, Felicia II, Coto y La Barrigona; y los **sectores** 1, 2, 3 y Cuatro Caminos (Figura 4).

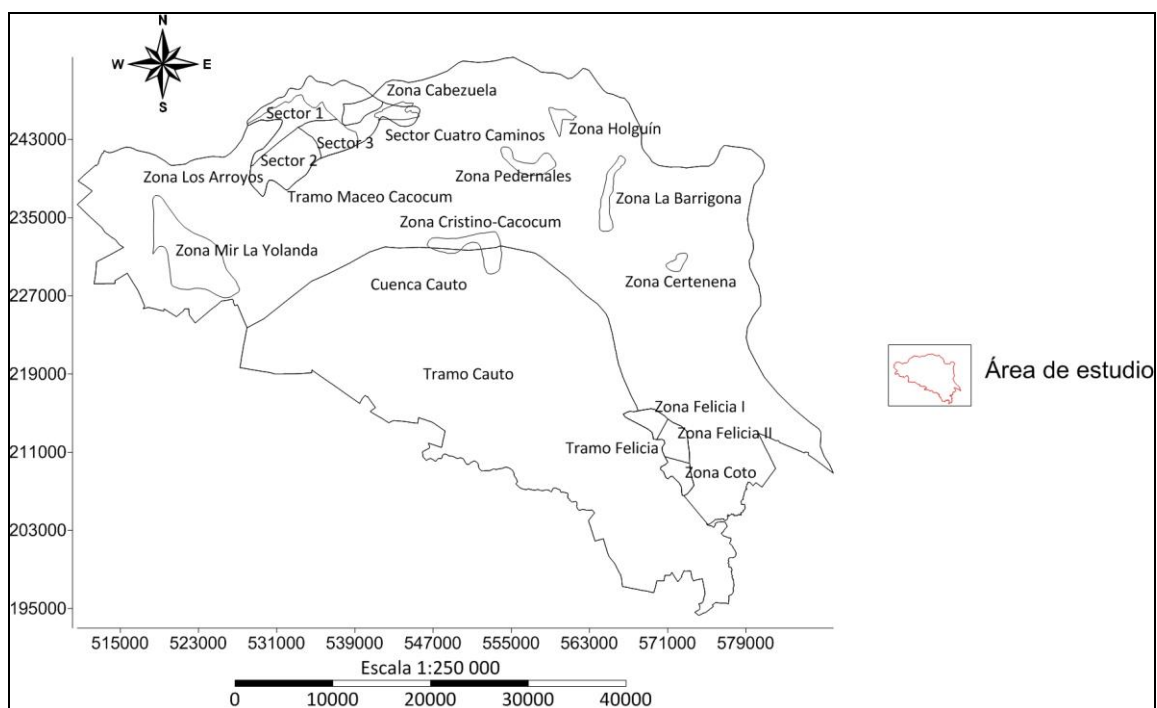


Figura 4. Sistemática hidrogeológica de la Cuenca Cauto, provincia Holguín. GEARH. (2000).

Las principales rocas acuíferas de estas litologías son las calizas de la Formación Camazán, en aquellos tramos donde las mismas son poco arcillosas, muy agrietadas y con desarrollo de carso; en orden le siguen las calizas agrietadas de la Formación Río Jagüeyes, Miembro Pedernales, Formación Cauto. Las aguas subterráneas en este territorio son de grietas, cavernas y poros, predominando las aguas freáticas, aunque en áreas considerables existen aguas artesianas, donde las rocas acuíferas se acuñan bajo estratos arcillosos o de margas y donde en la parte superior del corte existen estratos con potencias considerables de arcillas y otras rocas de matriz arcillosa.

En este territorio, la profundidad de yacencia de las aguas subterráneas es muy variada, desde menos de 1,00 m, hasta más de 20,00 m. La dirección del flujo subterráneo en el extremo norte es hacia el sur, desde el parte agua regional hacia la zona llana del Valle del Cauto; en su extremo este la dirección del flujo es variada hacia el oeste, sudoeste y sur, a partir del parte agua regional existente y que representa el límite entre las regiones hidrogeológicas Cauto y Nipe. En las proximidades del río Cauto, el flujo de las aguas subterráneas es paralelo al cauce del río. El río Cauto representa un dren regional de las aguas subterráneas en gran parte del valle del Cauto, tanto dentro de los límites de la provincia Holguín como fuera de ellos.

Teniendo en cuenta los tipos de rocas presentes en la región de estudio y los resultados de los Mapas hidrogeológicos a escala 1:100 000 de las hojas cartográficas Holguín, San Germán y Tunas, en el área de estudio se encuentran presentes los siguientes complejos acuíferos:

A2-3: Complejo acuífero clástico-terrágeno del Cuaternario. Representado por los Depósitos Aluviales y la Formación Cauto. El caudal específico se encuentra desde (0,01 a 5,0) L/s·m; la profundidad del nivel freático es de (0,20 a 21,00) m, las cotas del agua entre (14,00 y 75,00) m, con un gradiente hidráulico entre 0,000 1 y 0,02.

Los tipos de aguas predominantes son de tipo clorurada magnésica, clorurada magnésico-sódica y clorurada magnésico-cálcica, ocupando la mayor extensión; mientras que las de tipo bicarbonatada magnésica, bicarbonatada magnésico-sódica y bicarbonatada magnésico-cálcica ocupan menor extensión y también se pueden encontrar aguas clorurada sódica, cloruradas sódico-magnésica y cloruradas sódico-cálcica.

B3-4: Complejo acuífero terrígeno-carbonatado del Neógeno-Oligoceno. Representado por la Formación Río Jagüeyes. El caudal específico se encuentra desde (0,01 a 5,00) L/s·m; la profundidad del nivel freático es de (0,10 a 25,00) m, las cotas del agua entre (22,00 y 150,00) m, con un gradiente hidráulico entre 0,001 y 0,03.

Los tipos de aguas predominantes son clorurada sódica, clorurada sódico-magnésica y clorurada sódico-cálcica, clorurada magnésica, clorurada magnésico-sódica y clorurada magnésico-cálcica; bicarbonatada magnésica, bicarbonatada magnésico-sódica y

bicarbonatada magnésico-cálcica; bicarbonatada sódica, bicarbonatada sódico-magnésica y bicarbonatada sódico-cálcica; además se encuentran otros tipos de aguas: bicarbonatada clorurada sódica, bicarbonatada clorurada sódico-cálcica y bicarbonatada clorurada cálcico-sódica; clorurada bicarbonatada sódica y clorurada bicarbonatada sódico-cálcica y bicarbonatada cálcica, bicarbonatada cálcico-magnésica y bicarbonatada cálcico-sódica en áreas más pequeñas distribuidas en todo el complejo.

B₄₋₂: Complejo acuífero carbonatado-clástico del Neógeno-Oligoceno. Representado por la Formación Camazán y su Miembro Pedernales.

En la Formación Camazán el caudal específico se encuentra desde (0,01 a 17,00) L/s·m; la profundidad del nivel freático es de (0,15 a 33,00) m, las cotas del agua entre (88,00 y 281,00) m, con un gradiente hidráulico entre 0,004 y 0,05.

En el Miembro Pedernales, el caudal específico se encuentra desde (0,01 a 0,5) L/s·m; la profundidad del nivel freático es de (0,10 a 22,00) m, las cotas del agua entre (92,00 y 205,00) m, con un gradiente hidráulico entre 0,002 y 0,02.

Los tipos de aguas predominantes son bicarbonatada sódica, bicarbonatada sódico-magnésica y bicarbonatada sódico-cálcica, encontrándose, bicarbonatada clorurada sódica, bicarbonatada clorurada sódico-cálcica y bicarbonatada clorurada cálcico-sódica; además aparecen otras aguas como: bicarbonatada magnésica, bicarbonatada magnésico-sódica y bicarbonatada magnésico-cálcica y las aguas bicarbonatada cálcica, bicarbonatada cálcico-magnésica y bicarbonatada cálcico-sódica que ocupan una menor extensión.

C₂₋₄: Complejo acuífero clástico-carbonatado del Paleógeno-Cretácico. Representado en la hoja por la Formación La Jíquima del Cretácico. El caudal específico se encuentra desde (0,01 a 5,00) L/s·m; la profundidad del nivel freático es de (0,12 a 13,90) m, las cotas del agua entre (72,00 y 203,00) m, con un gradiente hidráulico entre 0,001 y 0,025.

Los tipos de aguas predominantes son bicarbonatada magnésica, bicarbonatada magnésico-sódica y bicarbonatada magnésico-cálcica, bicarbonatada clorurada magnésica, bicarbonatada clorurada sódico-magnésica y bicarbonatada clorurada

magnésico-sódica y bicarbonatada clorurada sódica, bicarbonatada clorurada sódico-cálcica y bicarbonatada clorurada cálcico-sódica y ocupando menor extensión la bicarbonatada sódica, bicarbonatada sódico-magnésica y bicarbonatada sódico-cálcica y la clorurada sódica, clorurada sódico-magnésica y clorurada sódico-cálcica.

C4: Complejo acuífero carbonatado del Paleógeno-Cretácico. Representado en la hoja por la Formación Charco Redondo. El caudal específico se encuentra desde (0,80 a 1,20) L/s·m; la profundidad del nivel freático es de (3,00 a 37,00) m, las cotas del agua entre (45,00 y 120,00) m, con un gradiente hidráulico entre 0,0001 y 0,025.

C5-2: Complejo acuífero vulcanógeno-sedimentario del Paleógeno-Cretácico. Representado por las formaciones Vigía, olistostroma Haticos y Crucero Contramaestre. El caudal específico se encuentra desde (0,01 a 7,20) L/s·m; la profundidad del nivel freático es de (0,00 a 32,30) m, las cotas del agua entre (20,00 y 270,00) m, con un gradiente hidráulico entre 0,000 2 y 0,037.

Los tipos de aguas predominantes son bicarbonatada magnésica, bicarbonatada magnésico-sódica y bicarbonatada magnésico-cálcica y bicarbonatada sódica, bicarbonatada sódico-magnésica y bicarbonatada sódico-cálcica, además se encuentran otros tipos de aguas ocupando una menor extensión: bicarbonatada clorurada magnésica, bicarbonatada clorurada sódico-magnésica y bicarbonatada clorurada magnésico-sódica, clorurada magnésica, clorurada magnésico-sódica y clorurada magnésico-cálcica y clorurada bicarbonatada sódica y clorurada bicarbonatada sódico-cálcica.

C6: Complejo acuífero intrusivos no ofiolíticos del Paleógeno-Cretácico. Representado por todos los intrusivos excepto los de origen ofiolítico. Los tipos de aguas predominantes son bicarbonatada magnésica, bicarbonatada magnésico-sódica y bicarbonatada magnésico-cálcica y bicarbonatada sódica, bicarbonatada sódico-magnésica y bicarbonatada sódico-cálcica.

E8-7: Complejo acuífero ultrabásico-metamorfizado del Cretácico-Jurásico. Asociación ofiolítica. Representado por las ultramafitas serpentinizadas y serpentinitas. El caudal específico se encuentra desde (0,01 a 8,20) L/s·m; la

profundidad del nivel freático es de (0,10 a 20,00) m, las cotas del agua entre (24,00 y 245,00) m, con un gradiente hidráulico entre 0,000 2 y 0,06.

Los tipos de aguas predominantes son bicarbonatada magnésica, bicarbonatada magnésico-sódica y bicarbonatada magnésico-cálcica ocupando la mayor extensión dentro del complejo, aunque existen otros tipos de aguas ocupando una menor extensión y muy localizadas como la bicarbonatada clorurada magnésica, bicarbonatada clorurada sódico-magnésica y bicarbonatada clorurada magnésico-sódica y la bicarbonatada clorurada sódica, bicarbonatada clorurada sódico-cálcica y bicarbonatada clorurada cálcico-sódica.

E₉: Complejo acuífero intrusivos básicos (gabroides) del Cretácico-Jurásico.

Asociación ofiolítica. Representado por gabroides desde diabasas hasta gabros de diferentes tipos. El caudal específico se encuentra desde (0,01 a 5,00) L/s·m; la profundidad del nivel freático es de (0,20 a 16,20) m, las cotas del agua entre (99,50 y 182,00) m, con un gradiente hidráulico entre 0,002 y 0,055.

El tipo de agua que predomina es bicarbonatada magnésica, bicarbonatada magnésico-sódica y bicarbonatada magnésico-cálcica, además se encuentran otros tipos de aguas en el área que son bicarbonatada cálcica, bicarbonatada cálcico-magnésica y bicarbonatada cálcico-sódica y la bicarbonatada sódica, bicarbonatada sódico-magnésica y bicarbonatada sódico-cálcica.

1.3.3 Geomorfología

En el territorio existen dos grandes estructuras geotectónicas: el basamento plegado pre-oligocénico y la cobertura neoplatafórmica del Oligoceno al Cuaternario, correspondiéndose la primera a la Zona Geomorfológica A y la segunda a la Zona Geomorfológica B, que se describen a continuación.

Zona geomorfológica A: Cinturón plegado pre-Oligoceno, erosivo denudativa, relacionada con las rocas del zócalo plegado pre-Oligoceno, con una extensión de 895,00 km². Las cotas en esta región están entre (80,00 y 400,00) m con promedio 170,00 m y las pendientes entre 0,2° y 50,0° con promedio de 10,4°. Esta zona se puede subdividir en varias subzonas:

Subzona A1. Elevaciones bajas erosivo-denudativas.

Subzona A2. Elevaciones bajas erosivo-cársicas.

Subzona A3. Llanuras onduladas erosivo-denudativas.

Zona geomorfológica B: Representada por la cobertura neoplatafórmica erosivo denudativa y acumulativa en las partes bajas relacionada con las rocas terrígeno-carbonatadas de la Formación Camazán, su Miembro Pedernales y la formación Río Jagüeyes al sur. Las cotas en esta zona están entre (24.81 y 310.00) m, con promedio 84.50 m y las pendientes entre 0° y 40° con promedio de 7°. Esta zona se puede subdividir según sus características morfométricas y morfoestructurales en las subzonas siguientes:

Subzona B1. Llanuras erosivo-denudativas entre colinas.

Subzona B2. Colinas bajas diseccionadas, erosivo-cársicas.

Subzona B3. Llanuras altas cársicas carbonatada-terrágena sur.

Subzona B4. Llanuras altas cársicas carbonatada-terrágena norte.

Subzona B5. Llanura fluvio-marina del Cauto, erosivo-denudativa.

A continuación se presenta el mapa morfo-tectónico para Cuba Oriental (Figura 5) propuesto durante los trabajos que hicieron, de conjunto con GEOCUBA Oriente Norte y la Empresa de Investigaciones y Proyectos Hidráulicos (RAUDAL) para el mapa geomorfológico y que generaliza las megaformas existentes en el relieve y su interrelación con las estructuras geológicas.

Se representan con signo positivo (+) las zonas de levantamiento reciente y con signo negativo (-) las zonas de hundimiento o descensos relativos. Los estudios geodinámicos que realiza GEOCUBA deben corroborar estos movimientos y la magnitud de ellos. De la misma forma, en las fallas de deslizamientos por el rumbo se simboliza la dirección de estos movimientos, no así la magnitud o velocidad de desplazamiento, la que deberán precisar dichos estudios geodinámicos.

También se representan los ejes de las grandes macroformas y su morfología de forma esquemática.

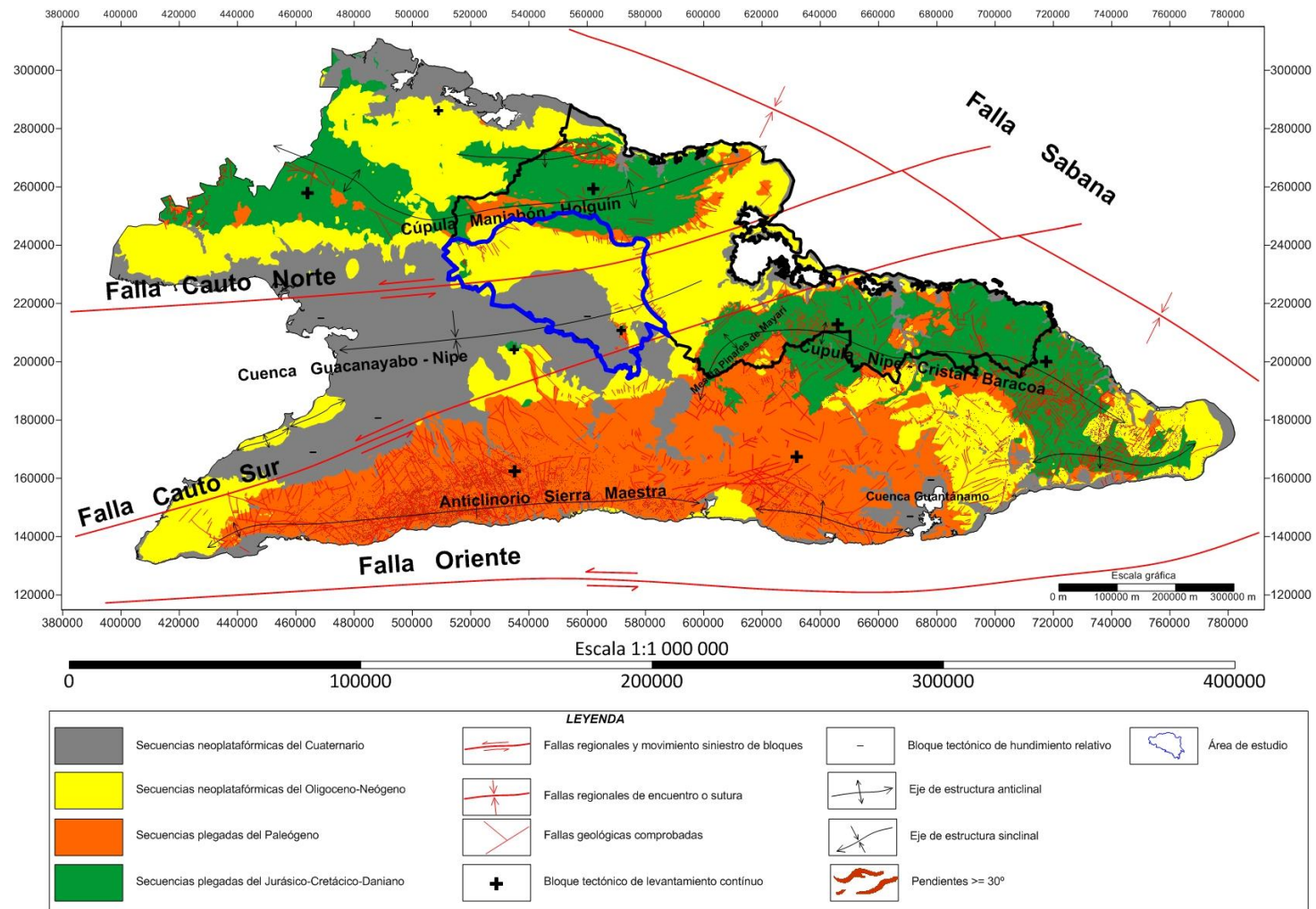


Figura 5. Mapa morfo-tectónico de Cuba Oriental.

1.3.4 Tectónica

La región se caracteriza por presentar dos grandes pisos estructurales: El basamento plegado y la cobertura neoplatafórmica del Oligoceno al Mioceno Medio parte alta.

El basamento constituye un piso estructural que se puede subdividir en dos subpisos: el del Cretácico y el del Paleógeno. Está intensamente plegado y fracturado con fallas normales verticales y subverticales, aunque predominan las fallas inversas de bajo ángulo, formadas durante el emplazamiento tectónico de estas secuencias al colisionar con la plataforma norteamericana o de Bahamas al norte y que forman casi todos los contactos entre las formaciones estratigráficas o asociaciones litológicas que afloran en la región.

Discordante sobre estas secuencias plegadas, se encuentran las rocas de la llamada neoplataforma o cobertura, formadas por las rocas post-Eoceno Medio (post-oligocénicas) desde el Miembro Pedernales de la Formación Camazán, las margas y calizas de esta última formación, las arcillas y rocas carbonatadas de la Formación Río Jagüeyes, así como las secuencias fluviomarinas de la Formación Cauto.

La cobertura neoplatafórmica se caracteriza por tener una yacencia suave poco alterada tectónicamente con buzamientos suaves hacia el sureste y sur entre 5° y 8°, aunque localmente en zonas de fallas recientes la yacencia puede ser más abrupta hasta 31° y formarse braquipliegues anticlinales y sinclinales de dimensiones pequeñas.

Estructuras plicativas y disyuntivas

En los estudios tectónicos precedentes del territorio se han reconocido las principales estructuras plicativas y disyuntivas que corresponden a cada uno de los periodos de la evolución geotectónica, de las cuales se presentan a continuación sus características respectivas:

Las principales estructuras plicativas, en la región son:

Anticlinorio norte: Desde La Jíquima hasta La Gloria y Bariay. El eje del cinturón plegado debe encontrarse algo más al norte, coincidiendo aproximadamente con el parte agua de las aguas superficiales y subterráneas.

Pliegues inclinados y volcados: Asociados a los frentes de corrimientos que coinciden con los contactos al norte de las ofiolitas, vulcanitas y rocas vulcanomícticas cretácicas.

Las principales estructuras disyuntivas, en la región son:

Falla Cauto Norte: Es una falla que marca prácticamente todo el desarrollo geológico de Cuba Oriental por lo menos desde el Eoceno Superior o desde el Oligoceno inicial. Es una falla de segundo orden, relacionado con el origen y desarrollo de la gran falla transformante Bartlett-Caimán de desplazamiento siniestro cuya parte norte se nombra falla Oriente, siendo una falla planetaria de primer orden.

Falla Los Arroyos-Certeneja-Güirabo-Tacajó: Es una falla regional, relacionada con la falla Cauto Norte de primer nivel. Ésta limita las calizas de la Formación Camazán de las secuencias terrígeno-carbonatadas arcillosas de la Formación Río Jagüeyes, formando en algunos sectores una frontera hidrogeológica al conformarse como un gran dique subterráneo que impide el paso de las aguas hacia el sur, permitiendo su captación en las secuencias carsificadas de la Formación Camazán.

Falla La Barrigona-Ceuta-Alcalá: Constituye una falla de plumaje a partir de la falla Los Arroyos-Certeneja-Güirabo-Tacajó y tiene dirección este-oeste.

CAPÍTULO II - METODOLOGÍA DE LOS TRABAJOS REALIZADOS

2.1. Introducción

En este capítulo se recoge la metodología empleada para realizar el estudio hidrogeológico del área de trabajo, se da cumplimiento a los objetivos propuestos. En la evaluación de la calidad de las aguas subterráneas del sector noroeste del Valle del Cauto; el trabajo se dividió en tres etapas fundamentales (Figura 6):

- Etapa I. Trabajos preliminares.
- Etapa II. Trabajos de campo y de laboratorio.
- Etapa III. Trabajos de gabinete.



Figura 6. Flujograma de la investigación.

2.2. Etapa I: Trabajos preliminares.

La revisión bibliográfica constituye la etapa previa de toda investigación, en la misma se recopila y revisa toda la información sobre el área de los trabajos. En la presente investigación se consultaron trabajos de diplomas, tesis de maestrías, tesis de doctorados, artículos científicos, investigaciones y otros documentos, con el fin de obtener la mayor cantidad de información posible sobre estudios desarrollados del

tema. Además, se consultó bibliografía actualizada sobre metodologías utilizadas en Cuba y en el mundo, lo que permitió establecer el marco teórico y conceptual de la investigación.

2.3. Etapa II: Trabajo de campo y laboratorio

Con el objetivo de cumplir las diferentes tareas propuestas se estableció la presente etapa, en la misma se determinaron los principales focos contaminantes en el área de estudio mediante un levantamiento hidrogeológico a escala 1:100 000, la toma de muestras de las aguas subterráneas y la determinación de las propiedades físicas, químicas, y microbiológicas en el laboratorio.

2.3.1. Determinación de los principales focos contaminantes

Durante esta etapa de trabajo se realizaron marcha rutas en las que se identifican los principales focos de contaminación que pudieran alterar la calidad de las aguas. En el trabajo de campo ejecutado se describe la geología de la zona y la vegetación presente.

2.3.2. Muestreo hidroquímico

Al realizar una investigación hidrogeológica el muestreo hidroquímico ocupa un lugar de suma importancia, esto influye en la confiabilidad de los resultados de la misma, es importante y necesario la seguridad, control y calidad con que se preserven y transporten las muestras al laboratorio, así como la cantidad de muestras que se toman garantizando que el resultado sea estadísticamente representativo. Al obtener una muestra de agua hay que tener en cuenta algunos requerimientos, como son: la limpieza de los recipientes para evitar una contaminación de la misma, el volumen debe de ser suficiente para realizar los análisis de las mismas.

Técnica empleada para las tomas de muestras de agua

Dentro de los principales requisitos en la realización de un muestreo hidrogeológico está la correcta manipulación de las muestras. Debe de estar ausente de procesos de deterioro o de contaminación antes de iniciar los análisis en el laboratorio. Para la toma de muestra, primeramente, se procedió al endulce del recipiente, que no es más que el enjuague dos y tres veces del mismo con la propia agua que se muestrea. Este

procedimiento es necesario para evitar la alteración de las propiedades del agua muestreada. El recipiente fue rellenado hasta la boca para evitar la concentración de oxígeno y cerrado herméticamente. Se realiza una correcta identificación de las muestras, se registran las observaciones del campo y del muestreo, localización del punto de muestreo con sus coordenadas, fotografías del sitio, descripción del área, entre otros datos de interés. Posterior se trasladan y se entregan al laboratorio en el tiempo establecido.

Se analizaron y muestrearon 345 puntos en toda el área de estudio.

2.3.3 Análisis físicos, químicos y microbiológicos

La determinación de las propiedades físicas, químicas y bacteriológicas de las muestras tomadas, se realizaron en la Empresa Nacional de Análisis y Servicios Técnicos. UEB Holguín.

Se determinaron los parámetros siguientes: pH, color, Conductividad Eléctrica (CE), Turbidez (TU), Nitrato (NO_3^-), Nitrito (NO_2^-), Carbonato (CO_3^{2-}), Hidrocarbonato (HCO_3^-), Cloruro (Cl^-), Sulfato (SO_4^{2-}), Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Sodio (Na^+), Potasio (K^+), Dureza Total (DT), Sólidos Totales Disueltos (STD), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Coliformes Totales (CT) y Coliformes Termotolerantes (CTT) (Tabla 3).

Tabla 3. Métodos analíticos empleados para la realización de los análisis.

Parámetros	Unidad de medida	Método utilizado
pH	Unidades de pH	Potenciómetro
color	UC	Método de comparación visual
Conductividad eléctrica	$\mu\text{S}/\text{cm}$	Potenciómetro
Turbidez	NTU	Turbidimétrico
NO_3^{1-}	mg/L	Espectrofotometría Ultravioleta
NO_2^-	mg/L	Colorimétrico
Sólidos totales	mg/L	Método de Cálculo
CO_3^{2-}	mg/L	Valoración
HCO_3^{1-}	mg/L	Valoración
Cl^{1-}	mg/L	Método Argentométrico (Valoración)

SO ₄ ²⁻	mg/L	Espectrofotométrico
Ca ²⁺	mg/L	Valoración con EDTA
Mg ²⁺	mg/L	Método de Cálculo
Na ⁺	mg/L	Fotométrico de Emisión con Llama
K ⁺	mg/L	Fotométrico de Emisión con Llama
Dureza total.	mg/L	Valoración con EDTA
Sólidos Totales Disueltos	mg/L	Método de los sólidos totales secados a (103-105) °C
Sólidos Solubles Totales	mg/L	Método de Cálculo
Coliformes Totales	NMP/100 mL	Técnica de los tubos múltiples de fermentación
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	Técnica de los tubos múltiples de fermentación

Los resultados se expresan en miligramos por litros (mg/L), pH en unidades de pH, conductividad en micro Siemens por centímetro (µs/cm) y la turbidez en Unidades Nefelométricas (NTU), el color en UC y los coliformes en NMP/100 mL.

2.4. Etapa III: Trabajos de gabinete

Luego de realizados los ensayos de laboratorio se procedió al procesamiento de toda la información y una vez obtenida la información necesaria se confeccionó el informe de la investigación.

Procesamiento y análisis de la información

A partir de los resultados obtenidos en el laboratorio se procesó la información mediante metodologías existentes, esto permitió la clasificación de las aguas según diferentes autores, así como el empleo de diferentes softwares, lo que propició cumplir el objetivo. El Microsoft Word 2019 se utilizó para confección y configuración del informe de la investigación. Se empleó el Microsoft Excel 2019 en la realización de las tablas y cálculos que definen las características específicas de cada muestra. La confección de los diferentes mapas fue posible gracias al software Surfer versión 19.1. Se empleó Microsoft Power Point 2019 en la realización de la ponencia de este trabajo.

La interpretación de los análisis físico-químicos se expresaron mediante tablas, gráficos, diagramas y las diferentes clasificaciones, para simplificar los datos y facilitar su mejor comprensión.

Evaluación de la calidad de las aguas por sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas

Para la evaluación de la calidad de las aguas se emplearon diferentes normas nacionales: Norma Cubana NC 827:2017, Agua potable - Requisitos sanitarios; Norma Cubana NC 1021:2014 Higiene comunal. Fuentes de abastecimiento de agua - Calidad y protección sanitaria; y normas internacionales como la aprobada por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006). Se emplearon las clasificaciones de varios autores en correspondencia con la composición química de las aguas y propiedades físicas de las mismas, referidas en De Miguel, C. (2012).

Clasificación de las aguas por su composición química

Clasificación según O. A. Aliokin. Esta clasificación está basada en el principio de división por los iones predominantes y relación entre ellos. El contenido en las aguas de sus iones principales está representado en miligramos-equivalentes.

Todas las aguas se dividen por el anión predominante en tres clases: Hidrocarbonatadas y carbonatadas ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$), sulfatadas (SO_4^{2-}), y clóricas (Cl^-). Estas a su vez se dividen en tres grupos por uno de los cationes predominantes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+) y cada grupo se divide en tres tipos por la relación entre los miligramos-equivalentes de los iones; en total se dividen en cuatro tipos. El primer tipo se caracteriza por la relación $\text{HCO}_3^- > (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$. Las aguas de este tipo son débilmente mineralizadas; el segundo tipo tiene la relación $\text{HCO}_3^- < (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) < (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ con este grupo se relacionan las aguas subterráneas, las aguas de los ríos y lagos de poca mineralización; el tercer tipo se caracteriza por la relación $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) < (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$, las aguas de este tipo son fuertemente mineralizadas, mezcladas y metamorfizadas; con este tipo se relacionan las aguas de mares y océanos y el cuarto tipo se caracteriza por la ausencia de iones HCO_3^- . Las aguas de este tipo son ácidas y existen solamente en las clases sulfatadas y clóricas en los grupos $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, donde no existe el primer grupo.

Clasificación de las aguas según su mineralización

Para determinar la clasificación de las aguas según su mineralización (Tabla 4) se basa en la clasificación de Aliokin, referida en De Miguel, C. (2012). Se utiliza la fórmula que relaciona mediante una fracción la sumatoria de los aniones y los cationes.

$$M = \frac{\sum A + C}{1000} (g / L)$$

Tabla 4. Clasificación de las aguas por su mineralización.

Mineralización (g/L)	Denominación de las aguas
< 1	Aguas dulces
1 - 3	Aguas poco salinizadas
3 - 10	Aguas saladas
10 - 50	Muy saladas
> 50	Rasoles

Clasificación de las aguas por el pH

La concentración de iones de hidrógeno (pH) en el agua determina el grado de acidez. Se expresa mediante la fórmula $pH = -\log (H^+)$. La clasificación de las aguas utilizada está basada en la de E. B. Pasovox referida en De Miguel, C. (2012). (Tabla 5).

Tabla 5. Clasificación de las aguas por su pH.

Valor del pH	Denominación de las aguas
< 3	Muy ácida
3 - 5	Ácidas
5 - 6.5	Débilmente ácida
6,5 - 7,5	Neutras
7,5 - 8,5	Débilmente básicas
8,5 - 9,5	Básicas
> 9,5	Muy básicas

Clasificación de las aguas por su dureza

Está representada por el contenido total de sales de calcio y magnesio presentes en las aguas subterráneas, expresadas en miligramos-equivalentes (mg.eq/L). A través de la

fórmula: $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$. Esta clasificación se encuentra referida en De Miguel, C. (2012) según el autor Aliokin (Tabla 6).

Tabla 6. Clasificación de las aguas por la dureza total.

Dureza (mg-eq/L)	Denominación de las aguas
< 1,5	Muy blandas
1,5 - 3,0	Blandas
3,0 - 6,0	Algo duras
6,0 - 9,0	Duras
> 9,0	Muy duras

Clasificación de las aguas por su grado de contaminación salina y el índice de salinidad marina

Las aguas subterráneas y superficiales pueden presentar contaminación salina producto a su relación con mares, contenido de sales en las rocas, etc. Para la determinación del grado de contaminación salina generalmente se utiliza la relación iónica de Simpson referida en De Miguel, C. (2012) (Tabla 7). Su clasificación, determinada a través de la fórmula:

$$C.S. = \frac{Cl}{CO_3 + CO_3H}, m.eq/L$$

Tabla 7. Clasificación de las aguas por su Grado de Contaminación Salina

Resultados relación C.S.	Denominación del agua
< 0,5	Agua normal
0,5 - 1,8	Agua ligeramente contaminada
1,8 - 2,8	Agua moderadamente contaminada
2,8 - 6,6	Agua bastante contaminada
6,6 - 15,5	Agua altamente contaminada
> 15,5	Agua de mar

Por correlación de iones en por ciento equivalentes (% eq) se logró la siguiente expresión para el coeficiente Índice de Salinidad Marina (ISM) referida en De Miguel, C. (2012) (Tabla 8):

$$ISM = \frac{\%Cl + \%Na}{\%HCO_3 + \%Ca}$$

Dónde: el % Cl⁻, % Na⁺, % HCO₃⁻, % Ca²⁺ representan el por ciento equivalentes de la suma total o parcial de aniones y cationes.

Tabla 8. Clasificación de las aguas por el Índice de Salinidad Marina (ISM).

Valor ISM	Mineralización (mg/L)	Clasificación por ISM
< 1	Predomina < 0,8	Aguas o acuífero no salinizado
1 - 1,9	0,9 - 1,6	Aguas o acuífero débilmente salinizado
2 - 6,9	1,7 - 5,8	Aguas o acuífero salinizado
7 - 21	5,9 - 17,7	Aguas o acuífero muy salinizado
> 21	> 17,8	Aguas o acuífero hipersalinizado

CAPÍTULO III - EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL SECTOR NOROESTE DEL VALLE DEL CAUTO, PROVINCIA HOLGUÍN

3.1. Introducción

En el presente capítulo se hace referencia a los resultados obtenidos en la investigación después de haber realizado las etapas anteriores. Se realiza una descripción de las principales fuentes de contaminación presentes en el área y su acción sobre las aguas de este territorio, se analizan las propiedades físicas, químicas y microbiológicas fundamentales que poseen las aguas subterráneas, lo que permite realizar sus diferentes clasificaciones y su evaluación. Se propone un plan de medidas con el fin de prevenir y mitigar la contaminación de las aguas.

3.2. Principales fuentes de contaminación de las aguas

Durante el levantamiento hidrogeológico se determinaron los focos contaminantes y puntos de peligros que hacen vulnerables la calidad del agua, así como las afectaciones que se pueden producir a la infraestructura hidráulica y al servicio de abastecimiento a la población. Los principales puntos de peligros y focos contaminantes fueron documentados, fotografiados y ubicados con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

En el territorio de estudio se comprobó que en las zonas urbanas hay muchas industrias, talleres, centros de salud, centros educacionales, servicentros y otras instalaciones que no poseen tratamiento primario antes de verter sus residuales a las corrientes fluviales y cañadas contaminando considerablemente las aguas superficiales y subterráneas. En los asentamientos periurbanos los principales problemas que se observaron y que afectan la calidad de las aguas son la proliferación de cochiqueras privadas y polleras que no cuentan con un buen tratamiento de los residuales, así como que los pozos están destapados y existen animales domésticos alrededor de los mismos, muchos no tienen ni siquiera brocal que impida que entre a ellos el escurrimiento pluvial. Además, las letrinas se construyen muy próximas a los pozos. En las zonas rurales lo que predomina es la presencia de corraletas de ganado mayor y

menor, así como los corrales de cerdos muy próximos a los pozos, además de las letrinas donde se disponen los residuales están cerca de los mismos.

Los Principales Focos Contaminantes, se clasifican en los siguientes tipos: Vertederos (tipo residuos Desechos); Unidades Militares (tipo residuos Hidrocarburos); Talleres (tipo residuos Hidrocarburos); Plantas (tipo residuos Áridos, Grasas, Hidrocarburos, Sustancias, Compuestos, Agua de lavado); Grupos Electrógenos (tipo residuos Compuestos, Hidrocarburos); Fábricas (tipo residuos Compuestos, Aguas de residuos, Metales); Depósitos (tipo residuos Excretas, Aguas de residuos, Compuestos); Centros Porcinos y Cochiqueras (tipo residuos Excretas, Desechos); Centros (Avícolas, Ganaderos, Internos, Hospitalarios, Escolares y otros) (tipo residuos Excretas, productos, desechos); Asentamientos Poblacionales (tipo residuos Desechos, Excretas); Cementerios (tipo residuos Lixiviados); Focos (tipo residuos Desechos de alimentos, excretas de animales, excretas humanas, productos químicos, aguas lixiviadas, compuestos tóxicos, grasas, hidrocarburos, áridos).

En la Figura 7, 8 y 9 se pueden observar puntos de contaminación de las aguas.



Figura 7. Pozos destapados, con letrinas, corrales y corraletas en sus alrededores.



Figura 8. Vertido de desechos sólidos cerca de las aguas superficiales.



Figura 9. Laguna de Oxidación para los residuales líquidos del CAI Urbano Noris. Los residuales son muy agresivos por su alto contenido en alcohol, se observa el agua de color blanquecino.

Como resultado de este trabajo se confeccionó un Mapa de Puntos de Peligros (Figura 10). En este mapa se observa una subdivisión en 3 áreas, que son: Zona I o de menor cantidad de puntos de peligros y focos contaminantes, se representa con el color verde; Zona II o de mediana cantidad de puntos de peligros y focos contaminantes, se representa con el color amarillo; y la Zona III o de mayor cantidad de puntos de peligros y focos contaminantes, que está asociada a las zonas más pobladas donde la actividad antrópica origina mayores volúmenes de desechos sólidos y de residuales líquidos que provocan más contaminación y amenazan con complicar más aún la situación de los

acuíferos en un futuro próximo haciendo inutilizables las reservas existentes de agua subterránea, se representa con el color rojo.

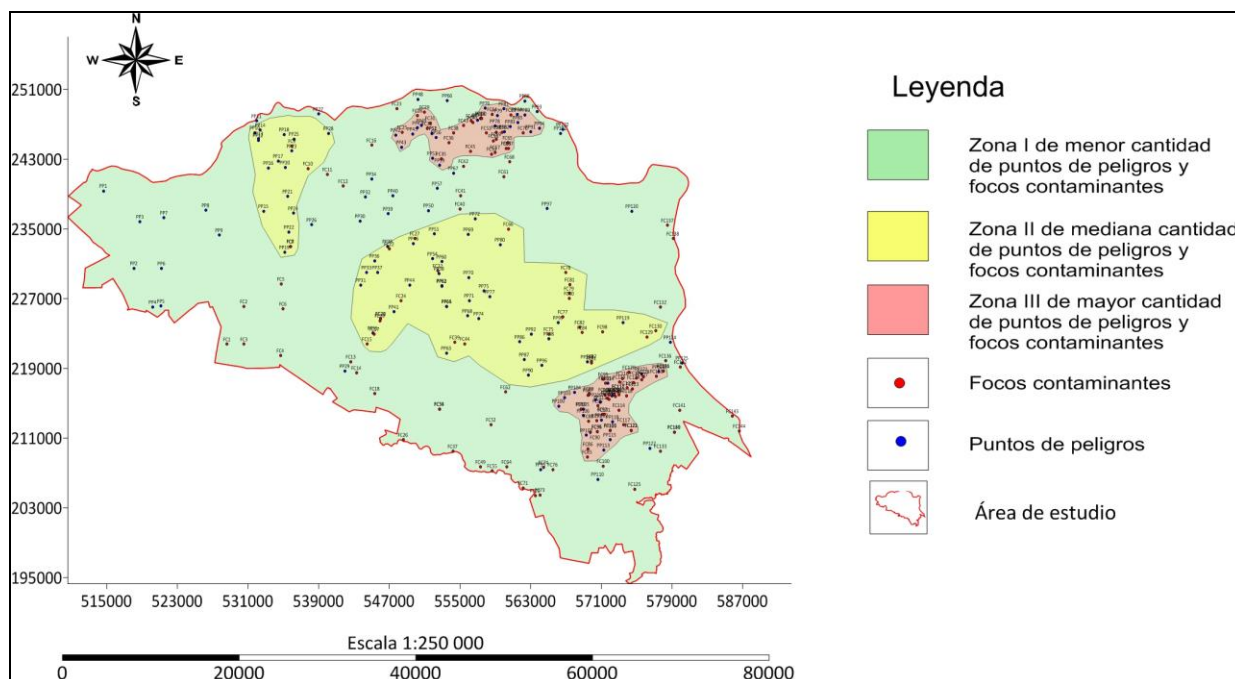


Figura 10. Distribución de los principales puntos de peligros y focos contaminantes.

3.3. Caracterización físico-química de las aguas

Se evalúan las aguas de acuerdo a las clasificaciones propuestas por varios autores recogidas en De Miguel, C. (2012), las Normas Cubanas NC 827:2017, NC 1021:2014 y la Norma de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006), se tiene en cuenta además la composición química y propiedades físicas de las mismas.

Clasificación de las aguas por su composición química según Aliokin

De acuerdo a la composición química de las muestras estudiadas y la relación entre los miligramos-equivalentes (mg-eq/L) de los aniones ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$), (SO_4^{2-}) y (Cl^-) las aguas predominantes son de la clase Hidrocarbonatadas. La principal clasificación teniendo en cuenta los cationes predominantes (Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+) fue la Sódica. El tipo de agua de mayor cantidad de muestras fue el 3 con la relación $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) < (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$.

En resumen las aguas que más abundan en este territorio son las Hidrocarbonatadas – Sódicas representando el 36 % de las muestras.

Clasificación de las aguas por su mineralización según Aliokin

En correspondencia con la mineralización y la clasificación de las aguas establecida por Aliokin, las muestras presentan valores de mineralización entre (0,3 y 9,4) g/L, clasificando desde aguas dulces hasta aguas saladas (Figura11), con un predominio de las aguas poco salinizadas las que representan el (61 %).

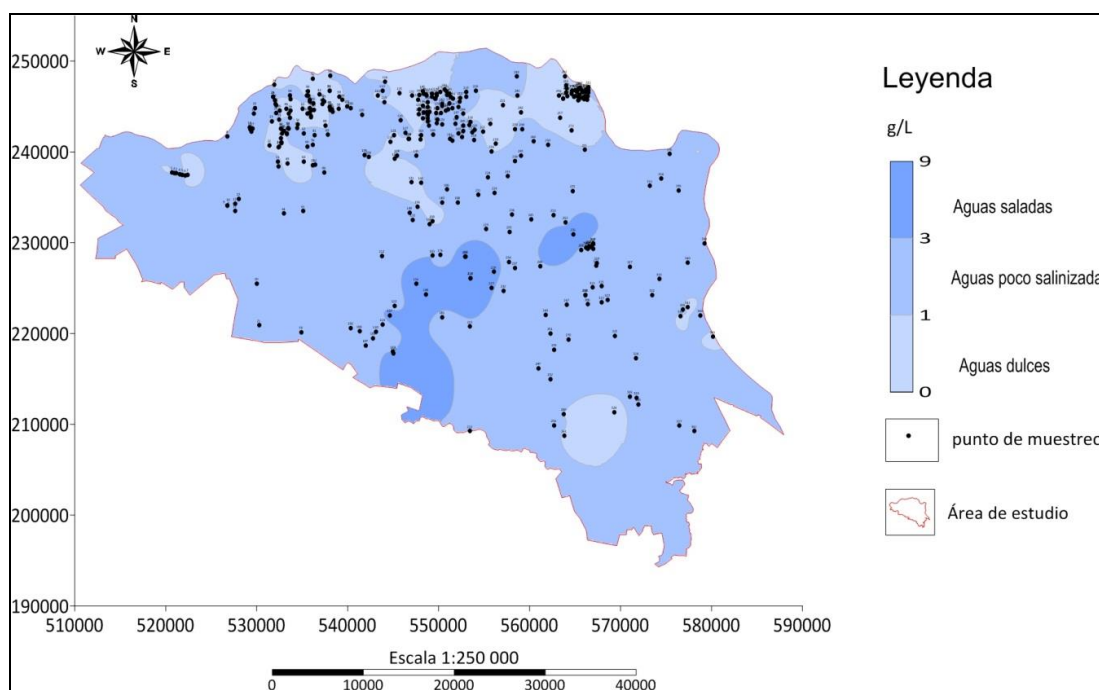


Figura 11. Comportamiento de la mineralización.

Clasificación de las aguas por el pH según E.B Pasoxov

De acuerdo a los resultados obtenidos en el laboratorio, los valores de pH se encuentran en el rango desde de 6,6 a 8,5 (Figura 12); clasificando de neutras (42 %) y debilménte básicas (58 %).

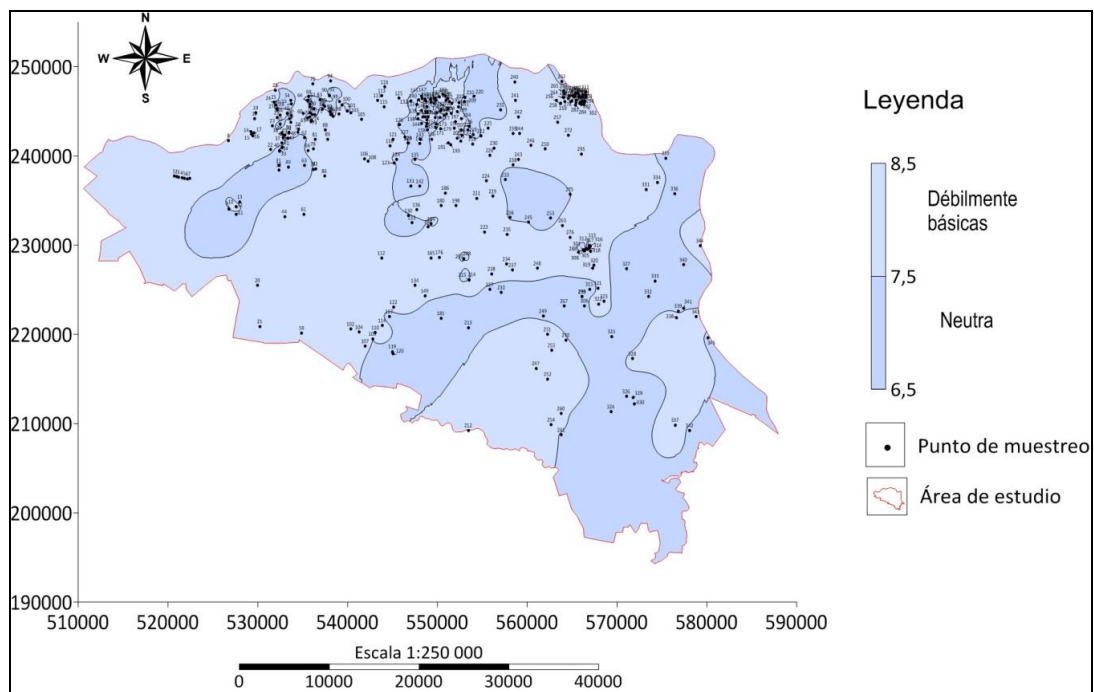


Figura 12. Comportamiento del pH.

Clasificación de las aguas por su dureza total según Aliokin

La dureza total se encuentra constituida por el contenido total en miligramos-equivalentes (mg-eq/L) de sales de calcio y magnesio, según la clasificación de las aguas por la dureza total establecida por Aliokin. En el área estudiada la dureza se encuentra en el rango de valores desde 1 a 127 clasificando desde muy blandas hasta muy duras (Figura 13), con un predominio de las aguas muy duras (45 %) y aguas duras (32 %). La menor representatividad la tienen las aguas muy blandas (0.1 %).

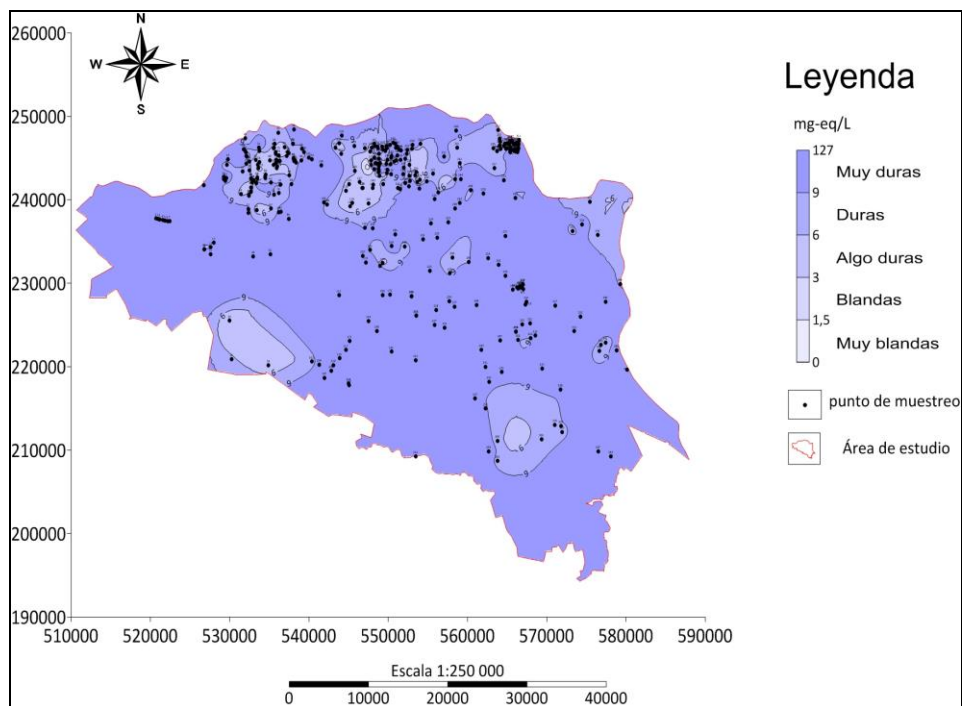


Figura 13. Comportamiento de la dureza total.

Clasificación de las aguas por su grado de contaminación salina

Los valores calculados del grado de contaminación salina a partir de los contenidos de Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , expresados en mg-eq/L. Los valores analizados para este caso de estudio arrojaron valores entre 0,1 y 15,1; su clasificación está en el rango desde agua normal hasta agua altamente contaminada (Figura 14), con predominio de las aguas ligeramente contaminadas (45%).

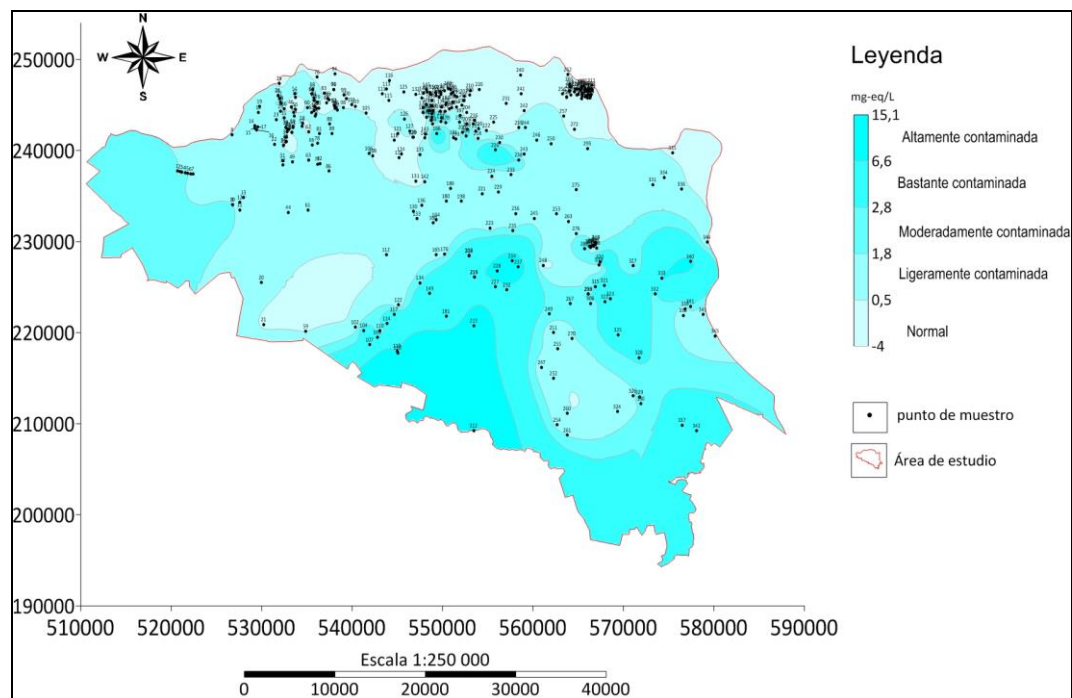


Figura 74. Comportamiento del grado de contaminación salina.

Clasificación de las aguas por el índice de salinidad marina

Para el cálculo del índice de salinidad marina se emplearon los contenidos de Cl^- , Na^+ , HCO_3^- , Ca^{2+} , expresados en por ciento. Las aguas investigadas presentan valores resultantes entre (0,2 y 6,6) %, por lo que las aguas clasifican en los rangos desde acuífero no salinizado hasta acuífero salinizado (Figura15), el mayor número de muestras se encuentran en la clasificación de acuífero débilmente salinizado (38 %), seguido del grupo de acuífero no salinizado (36 %).

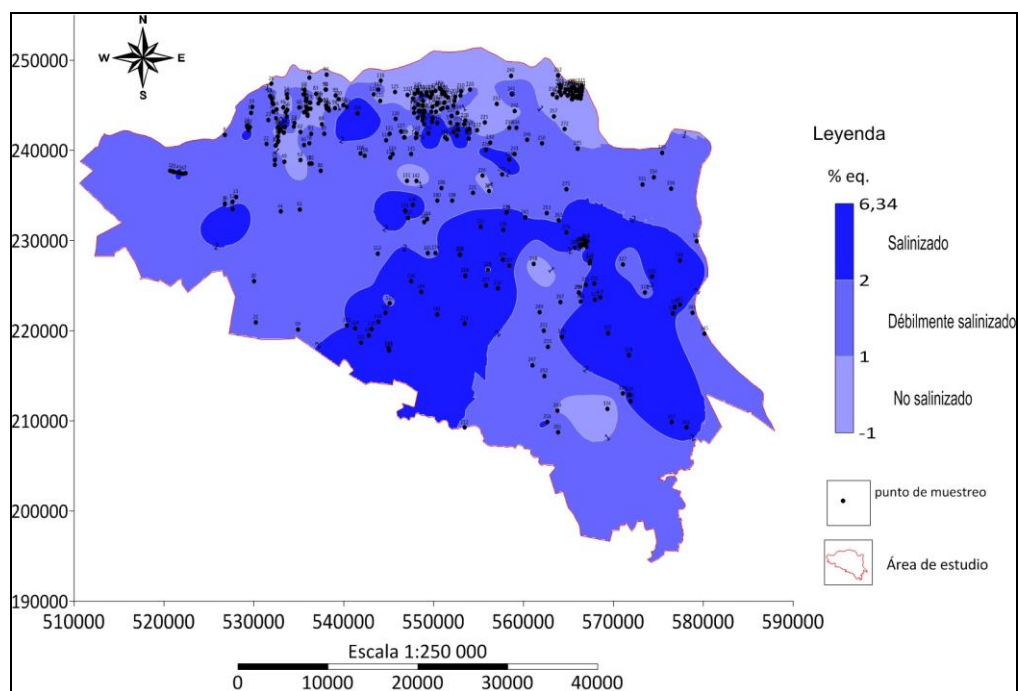


Figura 15. Comportamiento del índice de salinidad marina.

Según la NC 827:2017 y NC 1021:2014 existen parámetros que se encuentran por encima del límite máximo admisible, algunos de estos elementos puede apreciar en las figuras desde la 20 hasta la 25.

Ion Cl⁻: Se encuentran 131 muestras con valores de cloruro por encima del límite máximo admisible y representan el 37,97 %, los valores que sobrepasan la norma varían entre (252,00 y 5 743,00) mg/L.

Ion SO₄²⁻: Se encuentran 6 muestras con valores de sulfato por encima del límite máximo admisible y representan el 1.73 %, los valores que sobrepasan la norma oscilan entre (408,00 y 12 202,00) mg/L.

Ion Ca²⁺: Se encuentran 26 muestras con valores de calcio por encima del límite máximo y representan el 7,53 %, los valores fuera de la norma oscilan entre (200,00 y 720,00) mg/L.

Ion Mg²⁺: Se encuentran 52 muestras con valores de magnesio por encima del límite máximo y representan el 15,07 %, los valores fuera de la norma varían entre (151,00 y 1 176,00) mg/L.

Ion Na⁺: Se encuentran 130 muestras con valores de sodio por encima del límite máximo y representan el 37,68 %, los valores que sobrepasan la norma oscilan entre (200,00 y 4 151,00) mg/L.

Ion NO₃⁻: Del muestreo realizado 62 puntos presentan valores por encima del límite máximo, los que representan el 17,97 %, los valores fuera de la norma oscilan entre (45,00 y 2 500,00) mg/L.

Ion NO₂⁻: Del muestreo realizado 42 puntos presentan valores por encima del límite máximo, los que representan el 12,17 %, los valores fuera de la norma oscilan entre (0,30 y 11,80) mg/L.

Según los resultados de los análisis microbiológicos algunas muestras están altamente contaminadas, existe presencia de bacilos coli y coli fecales, lo que implica que el agua es no apta para el consumo humano, no reúnen los requisitos necesarios para ser utilizadas como agua potable.

Esta presencia de bacterias se debe fundamentalmente a la contaminación fecal, desagües de aguas albañales y domésticas, vertederos; además, al no existir en algunos lugares una red de alcantarillado, las aguas sucias se infiltran contaminando las aguas subterráneas.

Coliformes totales: Del muestreo realizado 16 puntos presentan valores por encima del límite máximo, los valores fuera de la norma oscilan entre (280,00 y 1600,00) NMP/100 mL. Los mayores valores se registran en los puntos de muestreo 140, 146 y 166 con un valor de 1600,00 NMP/100 mL.

Coliformes termotolerantes: Del muestreo realizado 44 puntos presentan valores por encima del límite máximo, los valores fuera de la norma oscilan entre (70,00 y 1 600,00) NMP/100 mL. Los mayores valores se registran en los puntos de muestreo 140 y 166 con un valor de 1600,00 NMP/100 mL.

3.4. Aguas de calidad favorable para consumo humano

Se realizó una evaluación de todos los parámetros que se encuentran con valores por encima del LMA establecidos en las normas (Tabla 9), se aprecia que en algunos puntos de muestreo coinciden varios parámetros y en otros casos no se ven afectados

por ninguno, por lo que se establecen rangos y se definen las áreas con mejor calidad hidroquímica del agua subterránea.

Los parámetros que se tuvieron en cuenta fueron: turbidez, color, pH, sólidos totales disueltos, dureza total, cloruros, sodio, sulfatos, calcio, magnesio, nitritos, nitratos, coliformes totales y coliformes termotolerantes.

Tabla 9. Valores del LMA establecido por las normas.

Parámetros a evaluar	LMA
turbidez	5 UNT
color	15 UC
pH	6,5-8,5
sólidos totales disueltos	1000 mg/L
dureza total	400 mg/L
cloruros	250 mg/L
sodio	200 mg/L
sulfatos	400 mg/L
calcio	200 mg/L
magnesio	150 mg/L
nitritos	0,3 mg/L
nitratos	45 mg/L
coliformes totales	< 2 NMP/100 mL
coliformes termotolerantes	< 2 NMP/100 mL

A continuación, se muestra la cantidad de puntos afectados y la cantidad de parámetros que influyen en su calidad (Tabla 10).

Tabla 10. Relación de la cantidad de parámetros afectados y la cantidad de puntos de muestreo afectados.

Cantidad de parámetros afectados	Cantidad de puntos de muestreo afectados
0	56
1	72
2	78
3	53
4	41
5	24
6	10
7	9
8	2

Los parámetros que poseen una mayor incidencia son la dureza total (163 puntos afectados), los cloruros (131 puntos afectados) y el sodio (129 puntos afectados).

Los puntos de muestreo que poseen una mayor contaminación con ocho parámetros afectados son el 215 y el 226.

Se confeccionó un mapa donde se agrupan en tres intervalos la cantidad de parámetros afectados por puntos de muestreo (Figura 16).

Se identificó de color verde los puntos que no presentan ningún parámetro afectado, de color amarillo los que poseen entre uno y cinco parámetros afectados y de color rojo los que representan más de cinco parámetros afectados.

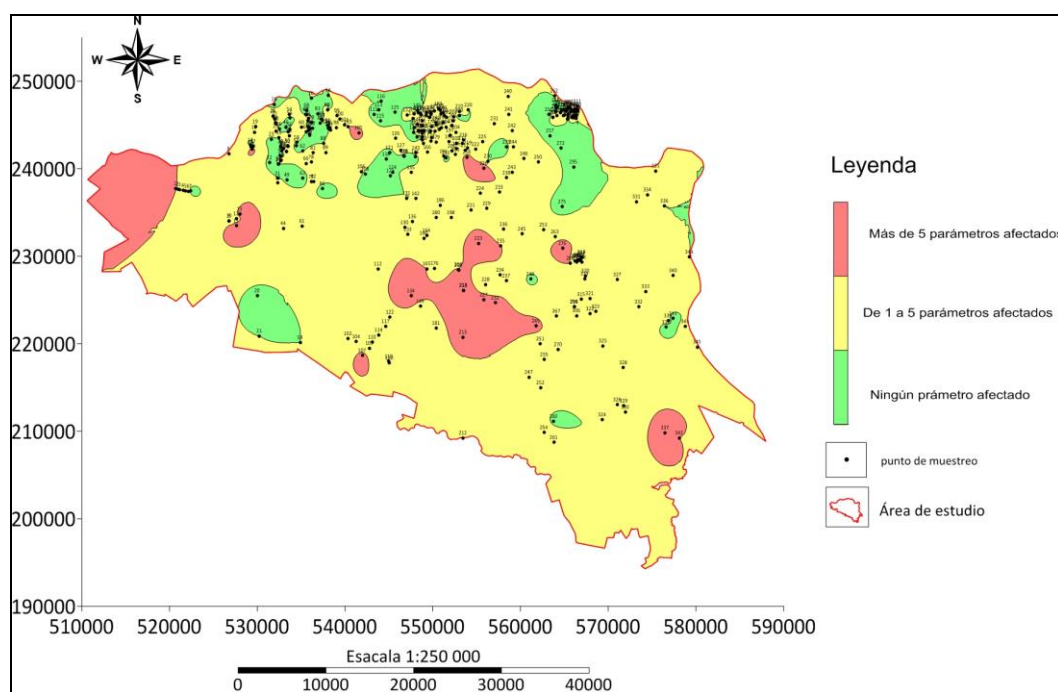


Figura 86. Cantidad de parámetros afectados por puntos de muestreo.

Para unificar y complementar toda la información procesada y con el objetivo de localizar las zonas dentro del área de estudio que representan una mayor calidad de las aguas subterráneas se unió la información obtenida del Mapa de distribución de los principales puntos de peligros y focos contaminantes (Figura 10) y el Mapa de cantidad de parámetros afectados por puntos de muestreo (Figura 16); como resultado se obtuvo el Mapa distribución de las áreas con más perspectivas a utilizar como agua para consumo humano (Figura 17).

En el mapa realizado se identificó de color verde las zonas con características de aguas favorables, donde no se presenta ningún parámetro afectado y coincide con una baja concentración de puntos contaminantes; de color amarillo las zonas entre uno y cinco parámetros afectados con una mediana contaminación; y de color rojo las zonas de aguas desfavorables, en este caso se localizan los puntos con más de cinco parámetros afectados y una alta concentración de actividad contaminante.

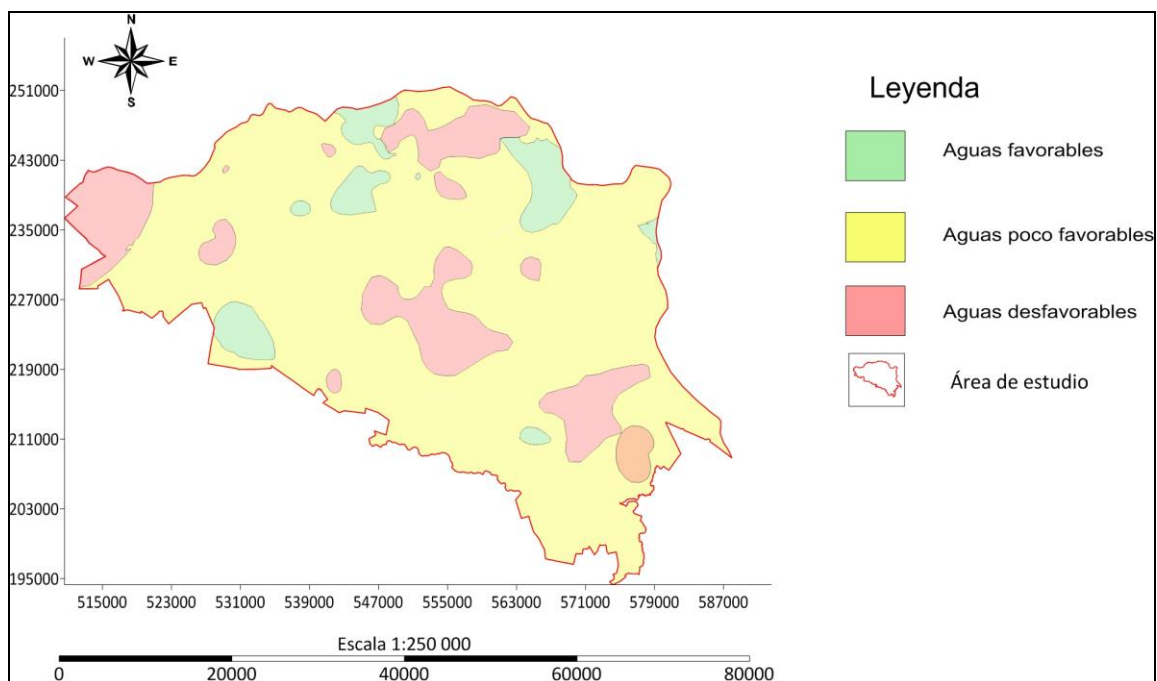


Figura 97. Distribución de las áreas con más perspectivas a utilizar como agua para consumo humano.

Los lugares con una menor afectación de acuerdo al muestreo realizado y los parámetros evaluados se localizan hacia la parte norte del área de estudio y en algunas localizaciones aisladas hacia el sur oeste; estas áreas poseen mayores perspectivas para localizar aguas subterráneas que sean favorables para el consumo humano. Esta información no refiere que las otras zonas no sean aptas para consumo humano, solo que no se consideran las de mejores condiciones de acuerdo a los parámetros estudiados.

3.5. Plan de medidas para prevenir la contaminación de las aguas

Se estableció un plan de medida, de manera que exista una mayor protección para los acuíferos. Este contemplará (de manera general y se adaptará a cada situación específica) los aspectos siguientes:

- Establecimiento de Zonas de Protección Sanitaria aprobadas por el Sistema INRH, alrededor de los Pozos de Explotación y Estaciones de Bombeo, las que deben contar con las condiciones requeridas para evitar el acceso de personas no autorizadas y de animales en su interior. Encargado: Grupo de Inspectores de Recursos Hidráulicos.
- Mantener activo el monitoreo sistemático de la calidad del agua, de manera que se puedan detectar las desviaciones o deterioro que se produzcan, determinar sus causas y se pueda accionar de inmediato para su restablecimiento. Encargado: Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de Holguín.
- Contar con un Plan de Educación Ambiental dirigido a la población residente en la zona, entidades estatales, cooperativas y otras formas de producción que tengan incidencia en este territorio para formar una conciencia acerca del significado de la contaminación y de los perjuicios que ella provoca sobre los acuíferos y la salud de la población. Encargado: Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos Holguín.
- Determinación de los sitios más adecuados para la ubicación de Vertederos de Desechos Sólidos y disposición de residuales líquidos que puedan afectar de manera significativa a los principales reservorios y áreas de explotación de aguas. Encargado: Empresa de Comunes.
- Evitar que los pozos criollos y cisternas estén destapados en las viviendas y fincas de la zona, pues son fácilmente contaminados y constituyen además fuentes de vectores de enfermedades. Encargado: Población de conjunto con el Grupo de Inspectores de Recursos Hidráulicos.

CONCLUSIONES

- El principal foco contaminante que afectan la calidad de las aguas subterráneas es la actividad antrópica relacionada con un mal manejo de los residuales líquidos y sólidos, así como una incorrecta ubicación de las fuentes de abasto de aguas subterráneas.
- Las aguas subterráneas que predominan en el sector noroeste del Valle del Cauto, clasifican como Hidrocarbonatadas-sódicas-tipo 3; poco salinizadas; muy duras; débilmente básicas; ligeramente contaminadas y acuíferos débilmente salinizados.
- Las áreas con calidad de las aguas subterráneas favorables para el consumo humano se localizan hacia el norte del área de estudio y en zonas aisladas del sur oeste.
- Se propone un plan de medidas para prevenir y mitigar los focos contaminantes entre las que destaca mantener activo el monitoreo sistemático de la calidad del agua.

RECOMENDACIONES

- Mantener el control sistemático de forma mensual de la calidad de las aguas, para contar con una información más actualizada que posibilite en el momento oportuno la toma de decisiones acertadas.
- La Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos Holguín debe de controlar el cumplimiento del plan de medidas propuestas a las instituciones implicadas con el objetivo de prevenir y mitigar la contaminación de las aguas subterráneas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asghari, B., et al. (2018). Data on assessment of groundwater quality with application of ArcGIS in Zanjan, Iran. *Data in Brief*, 18, 375.
- De Miguel, C. (2012). Hidrogeología aplicada con aspectos ambientales. Editorial Digital Universitaria Moa, Cuba. 374 p.
- Deloya, A. (2006). Métodos de análisis físicos y espectrofométricos para el análisis de aguas residuales. *Technología En Marcha*, 19(2), 31–40.
- Fernández, M. (2003). *Evaluación de la calidad de las aguas de consumo humano en la zona urbana de la ciudad de Moa*. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Departamento de Geología.
- GEARH. (2000). Sistemática hidrogeológica de la provincia Holguín. INRH.
- IGP. (2013). Léxico Estratigráfico de Cuba. Instituto de Geología y Paleontología. Tercera versión, La Habana, Cuba. Editorial Centro Nacional de Información Geológica. ISBN: 978-959-7117-58-2. 458 p.
- Jiménez, T., & Rodríguez, D. (2018). *Análisis del uso y manejo del agua subterránea en la Región Caribe Colombiana*. Universidad de Cartagena.
- Khare, P. (2017). A large-scale investigation of the quality of groundwater in six major districts of Central India during the 2010--2011 sampling campaign. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(9), 429.
- Liu, L., et al (2022). Occurrence and distribution of groundwater fluoride and manganese in the Weining Plain (China) and their probabilistic health risk quantification. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12403-021-00434-4>.
- Norma Cubana. (2014). NC 1021:2014 Higiene comunal — fuentes de abastecimiento de agua — calidad y protección sanitaria. Oficina Nacional de Normalización. 14 p.
- Norma Cubana. (2017). NC 46:2017. Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción. Oficina Nacional de Normalización. 106 p.

Norma Cubana. (2017). NC 827:2017. Agua potable. Requisitos sanitarios. Oficina Nacional de Normalización. 12 p.

Ogarekpe, N. M., et al. (2023). Groundwater quality index and potential human health risk assessment of heavy metals in water: A case study of Calabar metropolis, Nigeria. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 19, 100780. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215153223000041>.

OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable. *PRIMER APÉNDICE A LA TERCERA EDICIÓN*, 1.

Pérez, C. et al. (2018). Mapa Hidrogeológico a escala 1:100 000 de la hoja cartográfica 4978 Holguín.

Pérez, C. et al. (2020). Mapa hidrogeológico a escala 1:100 000 de la hoja cartográfica 4977 San Germán.

BIBLIOGRAFIA

- Antezana, R. N. V., & Limahuaya, Y. Y. (2022). Evaluación de la calidad de agua subterránea del Parque Industrial Taparachi del distrito de Juliaca. *Ñawparisun-Revista de Investigación Científica*, 3(4).
- APHA, AWWA, WEF (1995). Standard methods for examination of water descried. I.S.A.E. Greeberg y A.D.S.Eaton (editors). 9 ed.
- Asghari, B., et al. (2018). Data on assessment of groundwater quality with application of ArcGIS in Zanzan, Iran. *Data in Brief*, 18, 375. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235234091830266X>
- Blanco de la Paz, E., Brown, O., & García, F. (2021). Relationship between rain and groundwater in the hydrogeological sectors of the South Basin of Ciego de Ávila. *INGE CUC*, 17(2), 125-132. <https://repositorio.cuc.edu.co/handle/11323/10267>.
- Bracho, I. A., & Fernández, M. (2017). Evaluación de la calidad de las aguas para consumo humano en la comunidad venezolana de San Valentin, Maracaibo. *Minería y Geología*, 33(3).
- Chapoñan, J. C. (2023). Caracterización hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea del distrito de Jayanca, departamento de Lambayeque. <https://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/6023>
- Chibinda, C., Arada, M. de los A., & Pérez, N. (2017). Caracterización por métodos físico-químicos y evaluación del impacto cuantitativo de las aguas del Pozo La Calera. *Revista Cubana de Química*, 29(2), 303–321.
- Crespo, M. (2018). *Evaluación de la calidad de las aguas de abastecimiento del poblado Yamanigüey*. Tesis de grado. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Departamento de Geología.
- Cuéllar, L., Maldonado, G., Cepeda, Y. (2018) Evaluación de la calidad sanitaria del agua de consumo en comunidades urbanas. Ciudad de Sancti Spíritus. <https://www.google.com.cu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ah>

[UKEwj5-](#)

[eeZ6lyCAxWQrmoFHbRnAE8QFnoECAkQAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.convencionsalud2018.sld.cu%2Findex.php%2Fconvencionsalud%2F2018%2Fpaper%2Fdownload%2F551%2F407&usg=AOvVaw1nJoGsk_VxMqEEAzm-2onq&opi=89978449](#)

De Miguel, C. (2012). Hidrogeología aplicada con aspectos ambientales. Editorial Digital Universitaria Moa, Cuba. 374 p.

De Miguel, C., Sánchez, Y. (2011) Factores hidrogeológicos que influyen en la salinidad de los suelos. Ejemplo de estudio Valle del Cauto provincia Holguín. <http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1691>

De Miguel, C., Sánchez, Y. (2013) Caracterización hidrogeológica del Valle del Cauto, Cuba. Revista Minería y Geología, volumen 29, N° 2, pp. 16-34. ISSN 1993 8012.

Decreto 337. (2017). Reglamento de la Ley 124 de las Aguas Terrestres. Consejo de Ministros. GOC-2017-716-EX51. ISSN 1682-7511. pp. 1015-1047.

Deloya, A. (2006). Métodos de análisis físicos y espectrofométricos para el análisis de aguas residuales. Revista *Technología En Marcha*, 19(2), 31–40.

Fernández, M. (2003). *Evaluación de la calidad de las aguas de consumo humano en la zona urbana de la ciudad de Moa*. Tesis de Maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Departamento de Geología.

Ferrer, L. M., et al (2023). Caracterización integral de la cuenca hidrográfica del Río Baconao. *Revista Cubana de Meteorología*, 29(2).

Galliari, M. J. (2022). Procesos condicionantes de la calidad del agua subterránea en las zonas de borde continental del acuífero costero medanoso: aplicaciones al abastecimiento de agua en poblaciones rurales y al sustento de áreas naturales (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).

García, D. E., et al. (2007). Estratigrafía de la región de la cuenca del Cauto y su correlación con el subsuelo. Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana,

Cuba.

GEARH. (2000). Sistemática hidrogeológica de la provincia Holguín. INRH.

Giler, B. I. C., Gutiérrez, C. M., Mendoza, M. C., & Pérez, A. V. (2017). Water Quality of the Poza Honda Dam and Other Water Points Down. *Journal of College and University. This Is an Open Access Article under the*, 2454, 2261. https://www.researchgate.net/publication/316940041_Water_Quality_of_the_Poza_Honda_Dam_and_Other_Water_Points_Down

González, N. A., Peláez, R., & Sobrino, E. (2013). Características geológicas, hidrogeológicas y ambientales del sistema acuífero carbonatado sur en el Occidente de Cuba: sector Los Palacios-Candelaria. *X Congreso Cubano de Geología (GEOLOGIA´2013) Hidrogeología e Ingeniería Geológica*, 17.

González, L. I. y otros. (2002). Ingeniería Geológica. Editorial Pearson Educación. Madrid. ISBN: 84-205-3104-9. 715 p.

Gutiérrez, M., Alarcón, M. T., & Ochoa, J. M. (2022). Impacto de factores de concentración en la calidad del agua subterránea en el norte-centro de México. *TECNOCENCIA Chihuahua*, 16(2), 953-953.

Hassan, F. M., et al. (2017). Water quality assessment of Diyala river in Diyala province, Iraq. *Mesopo Environ J.*(4), 1, 52–61.

Herrera, V., et al. (2018). Calidad del agua subterránea para el riego en el Oasis de Pica, norte de Chile. *Idesia (Arica)*, 36(2), 181–191.

IGP. (2013). Léxico Estratigráfico de Cuba. Instituto de Geología y Paleontología. Tercera versión, La Habana, Cuba. Editorial Centro Nacional de Información Geológica. ISBN: 978-959-7117-58-2. 458 p.

Ivonnet, H. & Pérez, Y. (2016) Investigación Hidrogeológica del Municipio Calixto García. II Etapa. Archivo técnico RAUDAL.

Ivonnet, H., Pino, E. & Garrido, E. (2018). Estudio de salinización de la Cuenca Maceo-

San Germán. III Etapa. Archivo técnico RAUDAL.

Ivonnet, H. & Pino, E. (2020). Investigación Hidrogeológica Cálculo de Recursos y Reservas. Zona Hidrogeológica Los Arroyos. Etapa I. Archivo técnico RAUDAL.

Ivonnet, H. & Pino, E. (2021). Investigación Hidrogeológica Cálculo de Recursos y Reservas. Zona Hidrogeológica Los Arroyos. Etapa II. Archivo técnico RAUDAL.

Jiménez, T., & Rodríguez, D. (2018). *Análisis del uso y manejo del agua subterránea en la Región Caribe Colombiana*. Trabajo de grado realizado para optar por el título de Ingeniero Civil Universidad de Cartagena.

Khan, M. A., et al. (2023). Potential health risk assessment, spatio-temporal hydrochemistry and groundwater quality of Yamuna river basin, Northern India. *Chemosphere*, 311, 136880.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522033732>.

Khare, P. (2017). A large-scale investigation of the quality of groundwater in six major districts of Central India during the 2010--2011 sampling campaign. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(9), 429.

León, L., et al. (2022). Evaluación de la calidad del agua del manantial “El Paraíso” en Santiago de Cuba. *Revista Cubana de Química*, 34(2), 303-314.

Ley 124. (2017). De las Aguas Terrestres. Asamblea Nacional del Poder Popular. GOC-2017-715-EX51. ISSN 1682-7511. pp. 985-1014.

Liu, L., et al. (2022). Occurrence and distribution of groundwater fluoride and manganese in the Weining Plain (China) and their probabilistic health risk quantification. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12403-021-00434-4>.

Najafzadeh, M., Homaei, F., & Mohamadi, S. (2022). Reliability evaluation of groundwater quality index using data-driven models. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(6), 8174-8190.
<https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-16158-6>.

Norma Cubana. (2014). NC 1021: 2014 Higiene comunal — fuentes de abastecimiento

- de agua — calidad y protección sanitaria. Oficina Nacional de Normalización. 14 p.
- Norma Cubana. (2017). NC 46:2017. Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción. Oficina Nacional de Normalización. 106 p.
- Norma Cubana. (2017). NC 827:2017. Agua potable. Requisitos sanitarios. Oficina Nacional de Normalización. 12 p.
- Norma Cubana. (2007). NC ISO 1000:2007. Unidades SI y recomendaciones para el empleo de sus múltiplos y submúltiplos y de algunas otras unidades. Oficina Nacional de Normalización. 32 p.
- Nsabimana, A., & Li, P. (2023). Hydrogeochemical characterization and appraisal of groundwater quality for industrial purpose using a novel industrial water quality index (IndWQI) in the Guanzhong Basin, China. *Geochemistry*, 83(1), 125922. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009281922000629>.
- Núñez, S. B. (2019). Evaluación de las reservas de agua subterránea en el área La Ceiba-Certeneja de Güirabo, Holguín. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Departamento de Geología.
- Ogarekpe, N. M., et al. (2023). Groundwater quality index and potential human health risk assessment of heavy metals in water: A case study of Calabar metropolis, Nigeria. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 19, 100780. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215153223000041>.
- OMS. (2006). Guías para la calidad del agua potable. *PRIMER APÉNDICE A LA TERCERA EDICIÓN*, 1.
- Pérez, C., et al. (2018). Mapa Hidrogeológico a escala 1:100 000 de la hoja cartográfica 4978 Holguín.
- Pérez, C., et al. (2020). Mapa hidrogeológico a escala 1:100 000 de la hoja cartográfica 4977 San Germán.
- Pérez, C., et al. (2021). Mapa Hidrogeológico a escala 1:100 000 de la hoja cartográfica 4878 Tunas.

- Pérez, C., Ivonnet, H. & Bordón, R. (2011). Estudio de salinización de la Cuenca Maceo-San Germán. I Etapa. Archivo técnico RAUDAL.
- Pérez, C. & Pino, E. (2019). Investigación Hidrogeológica de Aguas Profundas en Maceo-Cristino-Cacocum. Etapa I. Archivo técnico RAUDAL.
- Pérez, C. & Quevedo, L. (2020). Investigación Hidrogeológica de Aguas Profundas Maceo-Cristino-Cacocum. Etapa II. Archivo técnico RAUDAL.
- Pérez, C. & Riera, E. (2021). Investigación Hidrogeológica de Aguas Profundas Maceo-Cristino-Cacocum. Etapa III. Archivo técnico RAUDAL.
- Pérez, Y. (2015) INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL MUNICIPIO CALIXTO GARCÍA. Archivo técnico RAUDAL.
- Pérez, Y. (2018). Calidad de las aguas subterráneas sector hidrogeológico La Melba, Moa para evaluar su empleo como agua mineral natural envasada. Tesis en opción al título de Máster en Geología.
- Pérez, Y. & Fitz, M. (2017). Investigación Hidrogeológica del Municipio Calixto García. III Etapa. Archivo técnico RAUDAL.
- Pino, E. & Ricardo, A. (2020). Investigación Hidrogeológica de la Salinización Fósil en la Afectación de las Aguas y Suelos de la Cuenca Maceo-San Germán. Archivo técnico RAUDAL.
- Rocha, D. S., Aquino, J. H., & Cayo, N. G. (2023). Caracterización hidroquímica de aguas subterráneas dentro del área de cobertura del caudal Cajamarca, Bolivia. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S2215-26522023000100001&script=sci_arttext.
- Rodríguez, Y. (2020). Investigación Hidrogeológica. Cálculo de Recursos y Reservas. Zona Hidrogeológica. Cabezuela. Archivo técnico RAUDAL.
- Rodríguez, Y. (2022). Sistema de alcantarillado y tratamiento de residuales ciudad Holguín. Variante III Subvariante 3-A. (Estación de bombeo y vial de acceso).

Archivo técnico RAUDAL.

- Romero, W. D., & Burillo, E. B. (2023). Determinación de la calidad del agua subterránea para consumo humano e identificación de las fuentes de contaminación fijas del Asentamiento humano Señor de los Milagros, distrito de Yarinacocha-Ucayali. <http://repositorio.unu.edu.pe/handle/UNU/6460>.
- Samandra, S., et al. (2022). Microplastic contamination of an unconfined groundwater aquifer in Victoria, Australia. *Science of the Total Environment*, 802, 149727. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721048026>.
- Sánchez, M. & Geler, T. - Ramiro Reyes González, R. (-). Cuenca del Cauto, caracterización morfométrica y afectaciones por contaminantes.
- Torres, P., Cruz, C. H., & Patiño, P. J. (2018). Water quality index in surface sources used in water production for human consumption: A critical review. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79–94.
- Trujillo, M. G. (2023). La influencia del uso del suelo en la vulnerabilidad de un acuífero en la cuenca hidrográfica San Juan, Cuba. *Agua y territorio= Water and Landscape*, (21), 21-35. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8667134>.
- UNESCO. (2022a). Cambio climático y medioambiente. Las aguas subterráneas pueden ser la solución a las crisis hídricas si se gestionan correctamente. <https://news.un.org/es/story/2022/03/1505842>.
- UNESCO. (2022b). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2022: Aguas subterráneas: hacer visible el recurso invisible; resumen ejecutivo. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380726_spa.
- Zhang, X., Miao, J., Hu, B. X., Liu, H., Zhang, H., & Ma, Z. (2017). Hydrogeochemical characterization and groundwater quality assessment in intruded coastal brine aquifers (Laizhou Bay, China). *Environmental Science and Pollution Research*, 24(26), 21073–21090.

ANEXOS

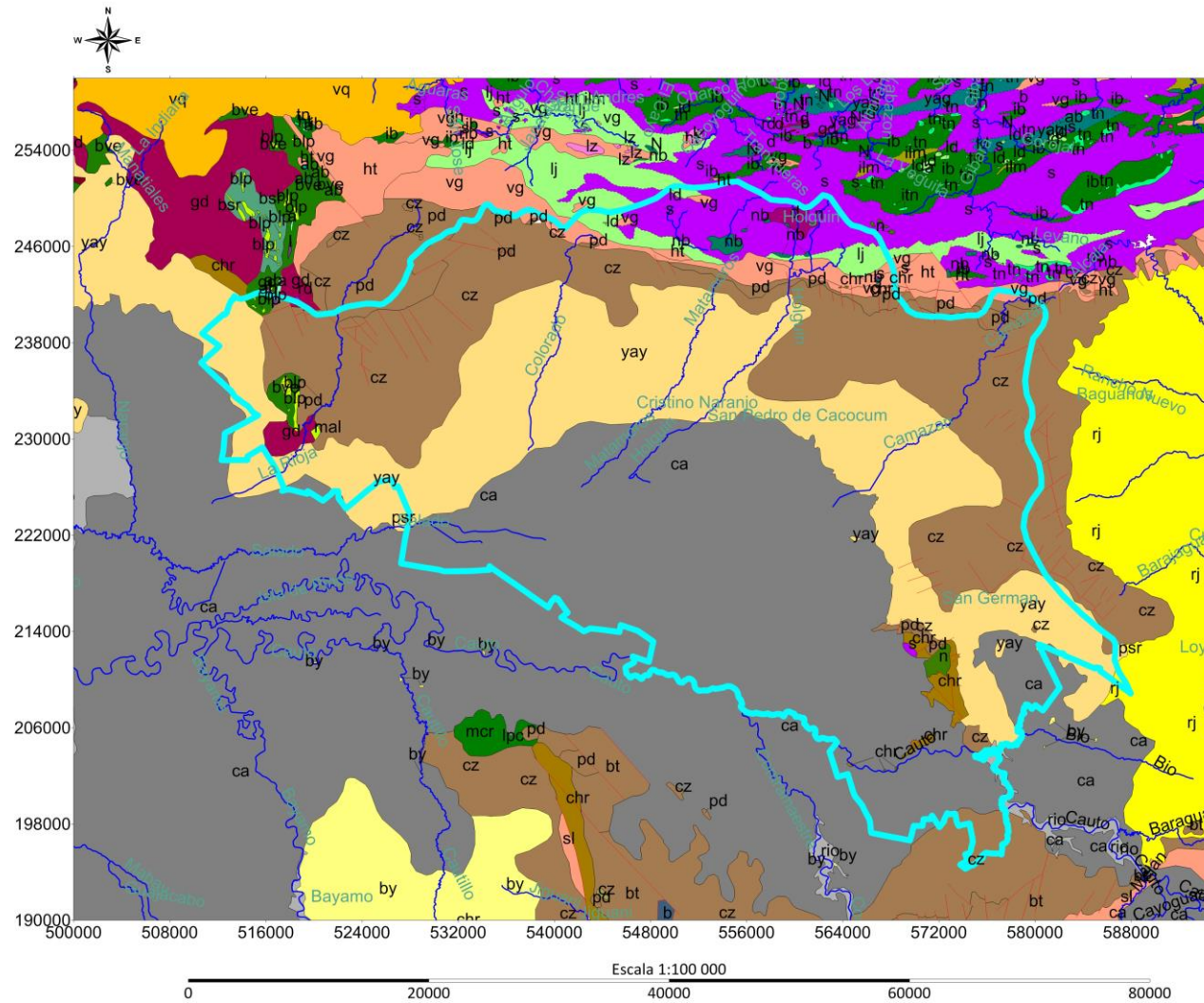


Figura 108. Mapa Geológico de Cuba a escala 1:100 000, tomado del IGP.

LEYENDA



Figura 119. Leyenda del Mapa Geológico de la Figura 18.

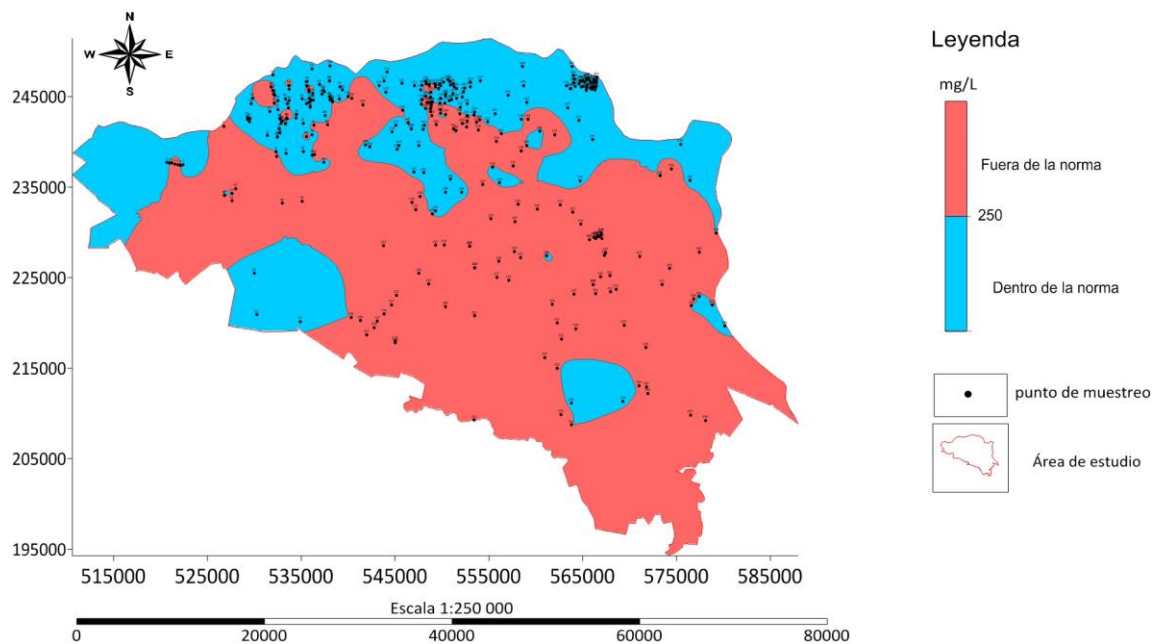


Figura 20. Comportamiento de los Cloruros.

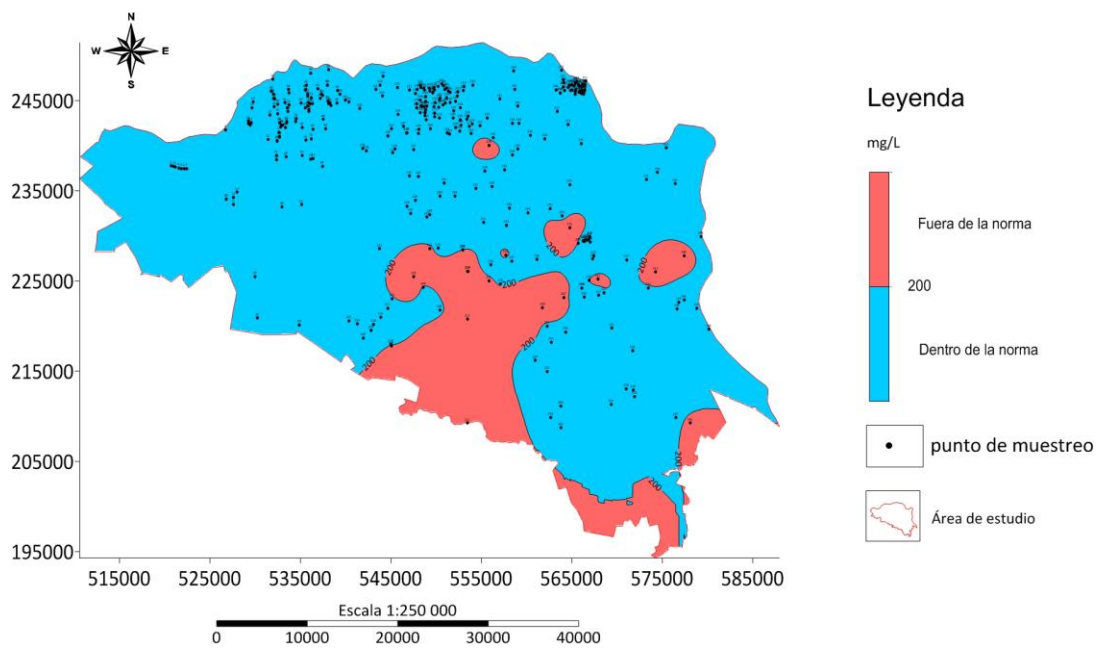


Figura 21. Comportamiento del Calcio

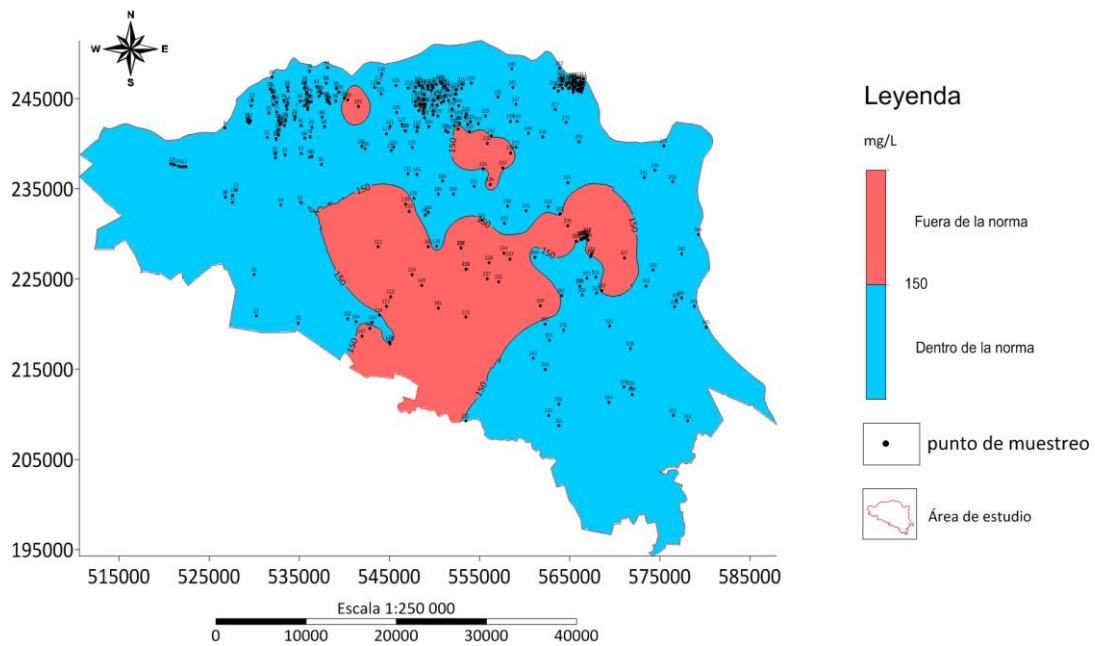


Figura 22. Comportamiento del Magnesio

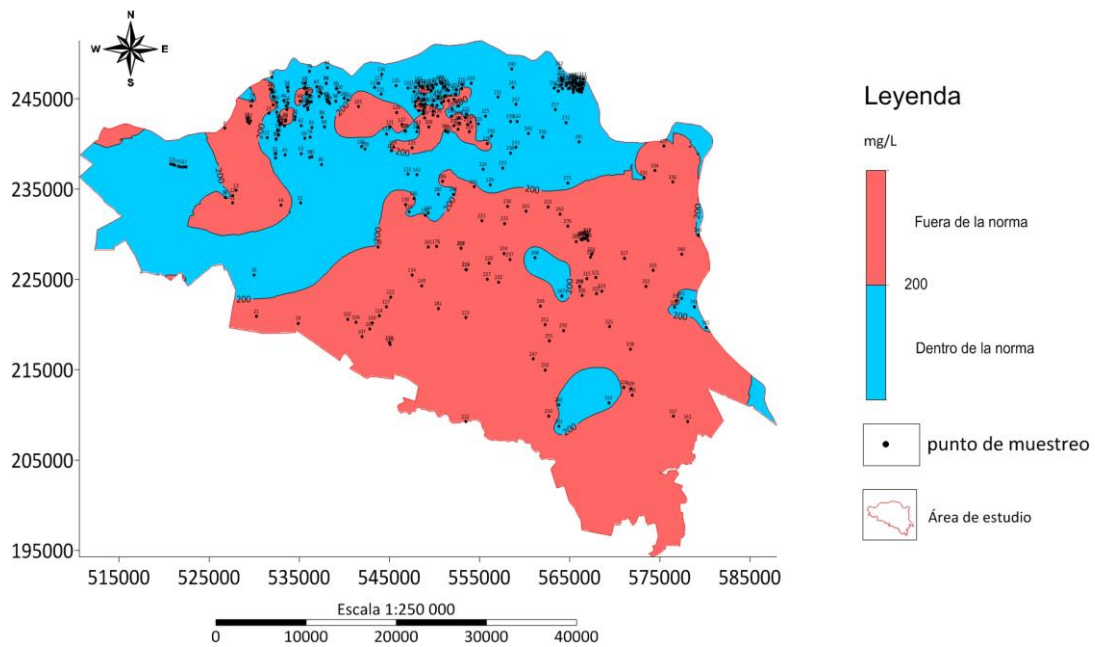


Figura 23. Comportamiento del Sodio

