

Caracterización de Sistemas
Hidrominerales en el Distrito Físico
Geográfico Pinar del Río

Lic. Boris Peña Forte

Tesis de Maestría en Geografía, Medio Ambiente y
Ordenamiento Territorial

Facultad de Geografía (U.H.)

2000

Tutor: Dr. J.R. Fagundo Castillo.

INDICE.

RESUMEN

I. INTRODUCCIÓN.

I.1 ANTECEDENTES

I.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO

I.3 OBJETIVOS

I.4 TAREAS

I.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

II.1 ASPECTOS TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN.

II.1.1 DISCUSIÓN TEÓRICA.

II.1.1.1. FACTORES QUE DETERMINAN LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS NATURALES.

II.1.1.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS AGUAS MINERALES.

II.1.1.3 DISCUSIÓN TEÓRICA SOBRE CONCEPTOS Y DEFINICIONES RELACIONADOS CON LAS AGUAS MINERALES.

II.1.1.4. DISCUSIÓN TEÓRICA SOBRE MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS MINERALES.

II.1.1.5 ASPECTOS RECOGIDOS EN LAS NORMATIVAS CUBANAS RELACIONADOS CON LAS AGUAS MINERALES.

II.1.2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

II.1.2.1 INVENTARIO DE LOS SECTORES EN ESTUDIO.

II.1.2.2 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN ANALÍTICA.

II.1.2.3. NIVELES DE ESTUDIO Y MÉTODOS APLICADOS EN LA INVESTIGACIÓN.

III BREVE DESCRIPCIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA DE LAS REGIONES DONDE SE UBICAN LOS SECTORES EN ESTUDIO.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

IV. 1 CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE AGUAS MINERALES EN LOS SECTORES HIDROMINERALES ESTUDIADOS.

IV.1.1. SECTOR HIDROMINERAL ZEQUEIRA.

IV.1.2 SECTOR HIDROMINERAL LOS PORTALES.

IV.1.3 SECTOR HIDROMINERAL AGUAS CLARAS.

IV.1.4 SECTOR HIDROMINERAL SAN VICENTE.

IV.1.5 SECTOR HIDROMINERAL CUEVA DE LOS PORTALES.

IV.1.6 SECTOR HIDROMINERAL SAN DIEGO DE LOS BAÑOS.

[IV.1.7 SECTOR HIDROMINERAL BERMEJALES.](#)

[IV.1.8 SECTOR HIDROMINERAL EL SITIO.](#)

[IV.1.9 SECTOR HIDROMINERAL MIL CUMBRES.](#)

[IV.1.10 SECTOR HIDROMINERAL CAJÁLBANA.](#)

[IV.1.11 SECTOR HIDROMINERAL PAN DE GUAJAIBÓN.](#)

[IV.1.12 SECTOR HIDROMINERAL RANCHO LUCAS.](#)

[IV.1.13 SECTOR HIDROMINERAL CACARAJÍCARA.](#)

[IV.1.14 SECTOR HIDROMINERAL POZO AZUL.](#)

[IV.1.15 SECTOR HIDROMINERAL RANCHO MAR.](#)

[IV.1.16 SECTOR HIDROMINERAL SOROA.](#)

[IV.1.17 SECTOR HIDROMINERAL LAS TERRAZAS.](#)

[IV.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES DE AGUAS MINERALES DEL SISTEMA HIDROTHERMAL SAN DIEGO DE LOS BAÑOS - BERMEJALES.](#)

[IV.2.1 APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE RECONOCIMIENTO DE PATRONES HIDROGEOQUÍMICOS.](#)

[IV.2.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE BALANCE DE MASAS.](#)

[IV.2.3 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTADÍSTICA MULTIVARIADA.](#)

[IV.2.4 ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL EQUILIBRIO TERMODINÁMICO DE LAS AGUAS, RESPECTO A DIFERENTES MINERALES.](#)

[IV.2.5 MODELACIÓN GEOQUÍMICA.](#)

[IV.2.6 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS ACUÍFEROS PROFUNDOS.](#)

[IV.2.7 MODELACIÓN GEOTÉRMICA](#)

[CONCLUSIONES](#)

[RECOMENDACIONES](#)

[BIBLIOGRAFÍA](#)

[ANEXOS](#)

I. INTRODUCCIÓN.

Las aguas minerales han sido utilizadas como bebida y con fines terapéuticos desde edades muy remotas, aunque durante muchos años su empleo tenía un carácter empírico y en algunos casos, las interpretaciones de sus efectos curativos o beneficiosos a la salud, estaban esencialmente vinculadas a las prácticas de hechicería. El desarrollo de las investigaciones en este campo, tanto desde el punto de vista de los estudios sobre sus características físico-químicas, así como desde el punto de vista de sus propiedades terapéuticas, está muy ligado al propio desarrollo de la Hidrología, la Física y la Química y muy fundamentalmente al desarrollo de la Medicina. Esto último explica el hecho de que las primeras ideas sobre el estudio de las aguas minerales estuvieran siempre vinculadas a las propiedades terapéuticas de las mismas.

En las primitivas civilizaciones, el uso de las aguas minerales, al igual que del resto de las aguas naturales, antecedió en mucho a las primeras ideas para explicar su origen, ocurrencia, propiedades y particularidades de su movimiento. Ya de estos tiempos se hace mención a viejos testamentos que contienen numerosas referencias con respecto a las aguas subterráneas, los manantiales, y los pozos; ejemplo de ello son los trabajos de Tolman (800 A. C.), el cual describe la existencia de grandes corrientes de aguas subterráneas (kanats), en Persia y Egipto.

Entre los griegos, el uso de las aguas minerales, alcanzó enorme difusión y la mayor parte de sus centros médicos disponían de manantiales que facilitaban las prácticas hidroterápicas, tal era el caso de los del Peloponeso, Cos, Púrgamo, Cnido, Rodas, etc. La Medicina griega alcanzó un avance considerable; pero, por lo que respecta a la utilización de la cura hidromineral, siguió prevaleciendo la concatenación del instinto, la casualidad, el tanteo y la observación, de manera semejante a lo ocurrido en los pueblos primitivos. En la antigua Roma los complejos termales alcanzaron también la condición de monumentos extraordinarios. Con la dominación romana se extendieron por toda Europa sus normas y costumbres, se erigieron templos a sus dioses y se difundió la utilización de las aguas minerales con fines terapéuticos. De esta manera surgieron múltiples termas que existen aún en la actualidad. La dominación de los bárbaros supuso la destrucción de gran número de termas romanas y un paso atrás en el uso de las aguas minerales y en el desarrollo de las curas termales. La cultura árabe, por su parte, fomentó el empleo de los baños así como la utilización de las aguas minerales con fines curativos y médicos aunque siempre guiados por el empirismo. La Escuela de Salerno de amplia influencia árabe, no aportó avances de consideración en el campo de la Hidrología en general, ni en el de sus aplicaciones terapéuticas.

Las cruzadas dieron paso también a un nuevo florecimiento en las ideas sobre el uso de las aguas minerales y sobre las curas termales, al utilizarse estas aguas para facilitar la recuperación de heridos y combatir las enfermedades del Oriente. Durante esos años, los intentos por estudiar y/o clasificar las aguas minerales, se reducían al estudio de aquellas propiedades cuya determinación dependía fundamentalmente de las principales características organolépticas de las mismas (olor, sabor, temperatura, etc).

En el siglo XV se producen hechos de extraordinaria significación histórica y de gran repercusión científica, aunque debamos reconocer que el movimiento de renovación intelectual que caracterizó al Renacimiento y que tanta influencia tuvo en la medicina, apenas produjo adelanto alguno en relación con los estudios sobre las aguas minerales y sus propiedades terapéuticas. Durante esos años el descubrimiento de la imprenta, contribuyó de forma decisiva a la generalización y difusión del conocimiento científico, incluido todo lo que respecta a la confección y divulgación del primer tratado sobre Hidrología (1473). De esta época son también testimonios escritos las obras: *De Balneis et Thermis* (Savonarola, 1485), que fue considerada como el primer tratado de Balneoterapia; *De Balneis, omnia quae extant apud Graecos, Latinos et Arabes* (1553), en la que se comenta la composición y efectos de muchas aguas minerales; *De Thermis* (Andrea Baccius, 1571), en la que se recogen igualmente las características y efectos de las aguas minerales, siendo considerada una pieza fundamental de la Hidrología de su tiempo. Ya por estos tiempos y muy incipientemente se comienzan a dar los primeros pasos en aras de clasificar las aguas mineromedicinales, a partir de criterios más científicos.

Es de mencionar que en el siglo XVIII se iniciaron los estudios analíticos meticulosos de las aguas minerales, siendo destacables los trabajos y publicaciones de Boyle, Hoffmann, Berzalius, Liebig, Balard, etc. A partir de este momento comienzan a aparecer en el mundo publicaciones sobre resultados analíticos en diferentes yacimientos de aguas minerales de Europa, fundamentalmente y comienzan a darse los primeros intentos por clasificar dichas aguas según criterios analíticos, científicamente probados.

Durante el siglo XIX los avances logrados en la hidroterapia se debieron a personas no relacionadas con el mundo de las ciencias médicas. Un ejemplo de ello lo constituyen los trabajos de los científicos alemanes Robert Bunsen (1811-1899) y Gustav Kirchoff, los cuales son los primeros en descubrir la presencia del elemento Cs en los manantiales minerales de Dürkheim, Alemania.

Durante el presente siglo el estudio de la composición de las aguas minerales tuvo un importante paso de avance en los trabajos desarrollados, durante 1924, por el científico norteamericano Frank Wigglesworth Clarke (1847-1931), el cual plantea la posibilidad de clasificar las aguas minerales según su anión principal, a partir de lo cual los tipos principales de aguas resultaban las cloruradas, sulfatadas, carbonatadas y ácidas. Dicha clasificación a pesar de tener un carácter muy simplista, constituyó un importante aporte al estudio de las aguas minerales. Con una relativa importancia se destacan también los trabajos de Intoni (1939), el cual señaló la presencia en el agua de la Fonte di Fiuggi, Italia, de un conjunto de elementos, como: Sr, Cu, Cr,

Ba, Zn, V, Sn, Rb, Ac, Pt y Pb, entre otros. En 1941 Strock publica un informe científico, en el que se recoge el análisis de algunas aguas minerales de las fuentes de Saratoga, Nueva York, E. U.

Hoy día se concede gran importancia no sólo al conocimiento de las propiedades químico-físicas y a la acción farmacológica de los diferentes componentes presentes en las aguas minerales, sino también a los mecanismos de acción de las mismas a través de diferentes vías (oral, inhalatoria o tópica), a los métodos y procedimientos de aplicación y a las condiciones propias de los centros balneológicos, **incluyendo los centros SPA.**

I.1 ANTECEDENTES

La presente investigación se fundamenta en el hecho de que Cuba cuenta con una gran cantidad y variedad de yacimientos de aguas minerales en virtud de las condiciones específicas de cada geosistema, los microorganismos presentes y del clima del país.

La acción beneficiosa de las aguas y peloides de los balnearios del país se conoce desde hace muchos años de manera empírica, no obstante, no es hasta después de la creación del Instituto de Hidrología y Climatología Médicas en el año 1945 y bajo la dirección del Dr. Víctor Santamarina, que se comenzaron a hacer investigaciones científicas encaminadas a dilucidar los mecanismos y los efectos que determinan las causa de tales curas; así como a establecer las prácticas terapéuticas adecuadas y los antagonismos de los diferentes recursos naturales. A pesar de que con la creación de ese Instituto, se comenzaron a desarrollar en Cuba investigaciones encaminadas a la caracterización de los recursos termales y a su aplicación con fines terapéuticos, esta actividad quedó relegada en la década del 60 debido, entre otras causas, a la influencia de las corrientes occidentales imperantes con relación a la medicina convencional.

En años más recientes y debido sobre todo, a la escasez de recursos, la denominada medicina natural ha cobrado fuerzas y en particular, las investigaciones relacionadas con las aguas y peloides, especialmente, después de la creación del Grupo Nacional de Termalismo (GNT), el cual desde su creación en 1991 ha desarrollado un papel importantísimo en la coordinación y dirección de las tareas que desde entonces, se han llevado a cabo por diferentes organismos del país. Como resultado culminante de esta labor, se crea el Centro Nacional de Termalismo “Dr. Víctor Santamarina” (CENTERVISA), perteneciente al Ministerio de Salud Pública (MINSAP), el cual tiene entre sus objetivos la dirección de las investigaciones multidisciplinarias en el campo del termalismo. El CENTERVISA es el encargado de dirigir metodológicamente la labor científica con relación a los recursos de aguas y peloides, introducir los resultados de estas investigaciones en la práctica.

Para los fines antes señalados, el CENTERVISA trabaja actualmente en el proyecto de investigación denominado: “Caracterización y evaluación de las propiedades de los yacimientos de aguas minerales y peloides de Cuba”, el cual fue aprobado por el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente

(CITMA) en el marco del Programa Ramal del MINSAP “Medicina tradicional y natural”.

Dentro del marco del citado proyecto se realiza la presente Tesis de Maestría, con la cual se pretende compilar, organizar y evaluar todo un conjunto de informaciones y datos existentes sobre las principales fuentes de aguas minerales del Distrito Físico Geográfico Pinar del Río y llegar a criterios de caracterización y clasificación, lo cual constituye una tarea de vital importancia para el CENTERVISA.

Es conocido que las aguas minerales constituyen, por lo general entidades únicas; esto es: su composición química es diferente en cada yacimiento, manifestación, etc. y la misma depende fundamentalmente de factores geológicos e hidrogeológicos. Dicha composición es estable en el tiempo y puede ser estudiada a través del uso de diferentes Métodos de Caracterización y Clasificación de las aguas Minerales y del análisis de su Variación Espacial y Temporal y de la aplicación de los métodos de la Estadística Multivariada y análisis de Regresión y Correlación Lineal, pudiendo ser expresada en términos de Patrones Hidrogeoquímicos, de Modelos de Balance de Masas y del estudio de las Condiciones de Equilibrio Termodinámico respecto a diferentes minerales, todo lo cual puede ser representado mediante diferentes diagramas hidroquímicos. Es necesario señalar también, que dependiendo del grado de información disponible, las aguas minerales pueden además ser estudiadas, a partir de la aplicación de métodos para Estimar la Temperatura y Yacencia de Acuíferos Profundos y los procesos de Mezclas de Aguas a ellos asociados, todo lo cual posibilita el establecimiento de Modelos Geoquímicos y Geotérmicos para el sector hidrogeológico en específico.

I.2 HIPÓTESIS DE TRABAJO

Lo anterior permite plantear la siguiente Hipótesis de trabajo: las aguas minerales pueden ser caracterizadas y clasificadas de diferente forma según su origen, las propiedades químico-físicas y su uso, etc, lo cual es de gran importancia dentro de los estudios que se vienen realizando en el país, en materia de dar un uso más adecuado al producto natural aguas minerales, con fines comerciales, terapéuticos y turísticos. Con dependencia de los criterios anteriormente planteados, en la presente tesis se pretende también, estudiar la posible existencia de regularidades en la distribución de los sectores hidrogeológicos que se estudian, con respecto a las unidades de la Regionalización Físico Geográfica y Paisajística.

En Cuba los estudios hidroquímicos han sido realizados, solo dentro del marco de los trabajos de exploración hidrogeológica, para la caracterización de las fuentes termales y el estudio fuentes de aguas minerales en los diferentes yacimientos, manifestaciones, etc, cabe señalar también que las aguas minerales de las fuentes del sector San Diego de los Baños han sido estudiadas desde el punto de vista terapéutico (Santamarina, 1948; Rodríguez, 1998), hidrogeológico (Peláez, 1990) y de caracterización químico-física (Embil, 1946-47; Embil y Trelles, 1947; Guerra, 1947a y b; López-Rendueles et al., 1949; Santana, 1987), por su parte las aguas minerales de las fuentes del sector Bermejales, situado a unos pocos kilómetros y con una composición similar, han sido menos estudiadas (Trelles, 1948a). Sin embargo, no se ha realizado hasta el presente un

estudio de tipo hidrogeoquímico encaminado a esclarecer los procesos geoquímicos que tienen lugar en los citados sectores y su relación con las propiedades químico-físicas de las aguas presentes. Esto último justifica la importancia del estudio que se realiza en el sistema hidrotermal San Diego de los Baños-Bermejales.

I.3 OBJETIVOS

El Objetivo General de la Tesis consiste en caracterizar las aguas minerales en un conjunto de sectores hidrominerales del Distrito Físico Geográfico Pinar del Río, a partir de un análisis integrador, teniendo en cuenta criterios tales como: origen, propiedades químico-físicas (temperatura, mineralización global, mineralización predominante y especial) y su uso actual y prospectivo. Dicho estudio, caracterización y clasificación se realizará en base a las ideas más actuales sobre la clasificación de aguas minerales, teniendo en cuenta criterios de varios autores.

Como Objetivos Específicos se plantean:

- Realizar una búsqueda bibliográfica sobre las diferentes denominaciones de las aguas minerales, sus propiedades, su ocurrencia, así como diferentes métodos de caracterización, clasificación y representación de las mismas, según criterios de diferentes autores.
- Seleccionar y aplicar los métodos más adecuados de caracterización, clasificación y representación de un conjunto de aguas minerales en el Distrito Físico geográfico Pinar del Río.

I.4 TAREAS

Son tareas de la Tesis las siguientes:

- Confección del Informe sobre la caracterización de las aguas minerales del Distrito Físico Geográfico Pinar del Río, donde se desarrolla y aplica una metodología integradora para caracterizar aguas minerales, desde el punto de vista hidrogeoquímico, lo cual permitió esclarecer el modo en que dichas aguas adquieren su composición química, destacándose el papel que en ello juegan los procesos geoquímicos de interacción agua-roca y de mezcla de aguas.
- Interpretación de los Modelos Geoquímico y Geotérmico del sistema hidrotermal San Diego de los Baños-Bermejales.
- Confección de una base de datos sobre concentraciones de macrocomponentes en las fuentes de aguas minerales, del Distrito Físico Geográfico Pinar del Río.
- Confección de un mapa de localización de los sectores hidrominerales estudiados.

I.5 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La Tesis se estructura de la siguiente forma:

I. INTRODUCCIÓN.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

III DESCRIPCIÓN REGIONAL

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

La Tesis cuenta con un total de 83 páginas, 4 anexos y 26 tablas.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

II.1 ASPECTOS TEÓRICOS Y METODOLÓGICOS DE LA INVESTIGACIÓN.

II.1.1 DISCUSIÓN TEÓRICA.

En el presente Capítulo se discutirán las principales ideas planteadas sobre los factores que determinan la composición química de las aguas naturales, para con posterioridad analizar el concepto de composición química de las aguas. Lo anterior debe constituir un basamento teórico importante para dar paso a una posterior discusión teórica sobre conceptos y definiciones relacionados con las aguas minerales y sobre los métodos de clasificación de las mismas. Al finalizar la discusión teórica se analizan los aspectos recogidos en las Normativas cubanas relacionados con las aguas minerales.

II.1.1.1. Factores que determinan la composición química de las aguas naturales.

Las aguas naturales adquieren su composición química mediante un proceso complejo, donde intervienen factores de tipo geológico, hidrogeológico, geomorfológico, pedológico, climático, antrópico químico-físico, y otros [22].

◆ *Factores geólogo-geomorfológicos.*

Los factores geológicos se relacionan con la litología (composición de los minerales de las rocas), el estado de yacencia de las secuencias estratigráficas, la tectónica, el agrietamiento, la textura y porosidad de las rocas, etc. La litología determina, por lo general, las facies hidroquímicas dominantes en una región determinada, es decir, el tipo de agua. Se debe esperar que la infiltración por percolación de las precipitaciones en rocas salinas, origine aguas superficiales y subsuperficiales (acuíferas) de tipo cloruradas alcalinas; en los depósitos de yeso o anhidrita, sulfatadas cálcicas; en las calizas y dolomias, bicarbonatadas cálcicas o cálcico-magnesianas; en las secuencias con abundante pirita, aguas con alto contenido de ion sulfato; en los granitos y otras rocas insolubles ácidas, aguas del tipo alcalinas o alcalinotérricas según el catión dominante, mientras que en las rocas ultrabásicas, éstas son bicarbonatadas magnesianas. Los aspectos vinculados al agrietamiento y porosidad de las rocas influyen de manera determinante en el estado de división de las partículas, mientras más pequeñas sean éstas, poseerán mayor superficie y se facilitará la disolución del mineral. Las aguas que drenan a través de rocas calcáreas, muy trituradas por los procesos tectónicos, adquieren un contenido mayor de calcita disuelta (dureza) que aquéllas que drenan a través de calizas más compactas.

Los factores de tipo geomorfológico también influyen en la composición química de las aguas, en especial, la pendiente de los macizos, el grado de erosión de los terrenos y la naturaleza de las propias formas del relieve, esta última influye fundamentalmente, en la redistribución superficial de las precipitaciones.

A pesar de que las formas tales como dolinas, sumideros, etc., se pueden considerar el resultado de los procesos de erosión en terrenos cárnicos, una vez creadas, facilitan o limitan la ulterior acción de corrosión química sobre el medio, lo cual se refleja en la composición química de las aguas.

◆ *Factores hidrogeológicos.*

Los factores hidrogeológicos están relacionados con la permeabilidad del acuífero, el tipo de flujo, su velocidad, así como la zona por donde se mueve el agua. Todos estos aspectos inciden en el tiempo de contacto entre el agua y el mineral, por ejemplo, si el flujo tiene lugar en condiciones difusas a través de las rocas, el tiempo de interacción del agua con los minerales es más lento y, por tanto, la cantidad de minerales disueltos es mayor que si las condiciones de flujo son de tipo turbulento a través de grietas más o menos amplias. El contenido de CO₂, la dureza y otras propiedades químico-físicas de las aguas naturales difieren de acuerdo con la forma en que se mueve el agua y la zona hidrogeológica que ocupa.

En la zona de alimentación del acuífero (visto el movimiento en sentido horizontal) o en la zona de aireación (visto en sentido vertical), el contenido de CO₂ de las aguas es relativamente elevado, puesto que en estos lugares tienen lugar los intensos procesos de descomposición bacteriana de la materia orgánica. El pH en esta zona suele no ser elevado y la dureza pequeña.

En la zona de conducción del acuífero el nivel de CO₂ suele ser menor, porque una parte del gas es consumido, como consecuencia de la interacción del agua con los minerales del medio rocoso. El agua en esta zona adquiere una mayor mineralización y un pH más elevado. Esta evolución se hace más evidente si, por ejemplo, se realiza un muestreo en un perfil de pozos desde la zona de alimentación hasta la de emisión del acuífero. A medida que el agua se aleja de la zona de alimentación decrece el CO₂ y aumentan el pH, así como el contenido de calcita disuelta.

En la zona saturada, las aguas adquieren una mayor mineralización. Sin embargo, como resultado de los procesos de mezcla de aguas, éstas pueden hacerse agresivas nuevamente y continuar disolviendo minerales.

En la zona de circulación profunda, las aguas se caracterizan por presentar elevados contenidos de CaCO₃, CaSO₄ y NaCl disueltos. En ocasiones aún poseen cantidades elevadas de CO₂ y H₂S, y en los manantiales por donde emergen precipita el exceso de calcita y yeso. Además poseen, por lo general, una temperatura más elevada y estable que las de tipo meteóricas, la circulación es más lenta y su caudal menor, el tiempo de interacción con los minerales es mayor.

En un trabajo desarrollado en Australia por Chebotarev (en Frezze y Cherry, 1980) en [15], en el cual fueron muestreados más de 10 000 aguas de pozos, se llegó a la conclusión de que en la naturaleza, las aguas

subterráneas tienden a evolucionar hacia la composición del agua de mar. El autor anteriormente señalado observó que esta evolución química en cuanto a los aniones dominantes, sigue aproximadamente las regularidades siguientes:



Estos cambios ocurren en la medida que el agua se mueve desde zonas de grandes caudales, a través de zonas intermedias, hasta zonas donde los flujos son escasos y el agua es vieja desde el punto de vista geológico. En las regiones cársicas montañosas de Cuba, la evolución química de las aguas sigue una tendencia similar a la observada por esos investigadores y alcanzan, por lo general, las facies ricas en SO_4^{2-} y Cl^- .

Las aguas naturales con elevados contenidos de cloruro (Cl^-) se suelen encontrar en regiones llanas que presentan gran agrietamiento o fallas, donde los horizontes acuíferos someros se ponen en contacto con otros más profundos. También en algunos pozos artesianos, que se han abierto a grandes profundidades durante los trabajos de prospección geológica o de búsqueda petrolífera; así como en las zonas litorales donde las aguas del acuífero cársico se mezclan con las de mar y como resultado de este proceso se incrementa la solubilidad de los minerales carbonatados (efecto de mezcla de agua y efecto salino o de fuerza iónica).

◆ **Factores pedológicos.**

Otros factores que también influyen sobre la composición química de las aguas naturales son los de tipo pedológicos, los cuales están asociados al tipo de suelo que yace sobre las secuencias estratigráficas.

El suelo puede ser el resultado del intemperismo de la roca o tratarse de una cobertura de origen fluvial, pluvial o glacial; su espesor puede variar desde un grosor apreciable hasta llegar a ser muy escaso o ausente. De sus características y condiciones pedoclimáticas depende la actividad microbiológica asociada, así como de la producción de gases y ácidos disponibles, que luego son arrastrados por las lluvias o las nieves al fundirse, haciendo posible la disolución de los minerales que forman parte del paquete de rocas subyacentes. En el caso de un macizo desnudo, el agua de las precipitaciones puede adquirir el CO_2 directamente de la atmósfera, pero en una proporción menor que la que se produce en el suelo. La microflora del suelo está compuesta de poblaciones de algas, actinomicetos, bacterias nitrificantes, desnitrificantes, desintegrantes de la celulosa, sulfobacterias y productoras de pigmentos, hongos y protozoos. Los microorganismos también están muy difundidos en las aguas naturales, incluso en condiciones de elevadas temperatura como ocurre en algunas fuentes mineromedicinales. El control de estos organismos, tanto en el suelo como en las aguas, es de gran importancia para determinar el estado de estas últimas y para su explotación en el termalismo.

◆ **Factores climáticos.**

Los factores climáticos intervienen de forma activa en la dinámica de la meteorización mecánica y química de los macizos, al permitir en el primer caso la fragmentación, traslado y acarreo de los minerales lejos del lugar de origen, así como facilitar en el segundo caso, la disolución de los minerales de las rocas. Mientras

más intensa sea la acción mecánica, más se facilita al agua su acción corrosiva. Los elementos del clima más determinantes en el modo en que las aguas adquieren su composición química son: la temperatura, humedad relativa, intensidad y duración de las precipitaciones, intensidad y duración de las radiaciones, velocidad del aire, entre otros.

◆ ***Factor antropogénico.***

Dentro de los factores ambientales resulta importante analizar el papel que desempeña el factor antrópico en la composición química de las aguas. La actividad del hombre causa un deterioro progresivo de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. A pesar de que estas últimas son menos susceptibles a la contaminación, una vez contaminadas, se hace muy difícil restablecer su calidad original (González y Jiménez, 1988) en [22]. Con vistas a preservar la calidad de los recursos hídricos, de forma tal que se puedan utilizar racionalmente en beneficio de la economía, se han establecido zonas de protección sanitaria, como tal se denomina el área alrededor de la toma de agua, donde se establecen diferentes tipos de regulaciones con el objetivo de evitar la contaminación y hacer mínimo el riesgo de su degradación.

En los últimos años, se han llevado a cabo muchas investigaciones aplicadas en el campo de la Hidrogeología, con el objetivo de establecer las zonas de protección sanitarias alrededor de las fuentes de captación de interés económico social (Dioxian, 1987; Fritz y Pavicic, 1987; Kullman, 1987 y otros) en [22]. En Cuba se han realizado, recientemente, numerosos trabajos con vistas a establecer las zonas de protección sanitarias de los yacimientos de aguas minerales y mineromedicinales (Ruz et al, 1993; Expósito et al, 1993; Iraola y Lugo, 1993) en [22].

La falta de cultura en relación con lo que debe ser la zona de protección de una fuente de abasto o una fuente mineromedicinal, hace que con frecuencia se construyan instalaciones sanitarias y otras similares en la misma área en que se encuentra el pozo que se utiliza para el consumo de las personas o un manantial empleado con fines balneológicos, lo cual da lugar a que por percolación pasen a la fuente gérmenes patógenos y se requiera instalar un sistema costoso de tratamiento del agua. Esta forma de contaminación era muy frecuente en muchos pueblos de nuestro país hace algunos años e incidía de manera significativa en un alto índice de parasitismo en la población infantil. Las unidades de Salud Pública, particularmente las de Higiene y Epidemiología velan porque no se produzcan enfermedades de tipo microbiológico tanto por ingestión de aguas contaminadas como por contacto en balnearios medicinales. Con vistas al control de la calidad de las aguas naturales, también se han elaborado políticas y sistemas de vigilancia, mediante el registro sistemático de algunos indicadores de tipo químico-físico y bacteriológico. Con relación a las aguas minerales, el control de su calidad se garantiza a través de la Oficina Nacional de Recursos Minerales del MINBAS.

◆ **Factores químico-físicos.**

Los factores químico-físicos están regidos por las leyes termodinámicas que controlan la disolución de los minerales, estos factores desempeñan un papel importante en la forma en que las aguas naturales adquieren su composición química. Entre estos se destacan: Disolución congruente e incongruente de los minerales, El pH del agua, Equilibrio de los carbonatos, Efecto de ion común y efecto salino [22], Potencial de oxidación-reducción, Intercambio iónico y adsorción, y otros, que serán discutidos en este trabajo.

a) Disolución congruente e incongruente de los minerales.

Cuando los productos de una reacción de disolución son todas especies iónicas, se dice que la disolución es congruente. Cuando por el contrario, la disolución de un mineral da lugar a especies iónicas y moléculas no solubles, se dice que la disolución es incongruente. Este último es el caso de muchos aluminosilicatos. En presencia de CO₂ el agua disuelve este tipo de mineral y libera sodio, bicarbonato y ácido silícico en el seno de la solución, mientras deposita el mineral arcilloso caolinita. Este proceso ocurre corrientemente como resultado del intemperismo de las rocas graníticas.

En el proceso de disolución de los carbonatos se suelen producir disoluciones incongruentes cuando están presentes calcita y dolomita o calcita (Picknett, 1972; Wigley, 1973) y yeso (Wigley, 1973) en [22]. Las aguas en estos casos pueden disolver secuencial o sucesivamente estos minerales. Donde coexistan calcita y dolomita a bajas temperaturas, cuando el agua se encuentre saturada respecto a la dolomita, será sobresaturada respecto a la calcita, precipitando este último mineral a medida que se disuelve el primero; en este caso el agua disuelve incongruentemente a la calcita. Si por el contrario, este proceso ocurre a una temperatura superior a 10° C, se producirá la disolución de la dolomita en forma incongruente. Si el proceso de disolución de ambos minerales tiene lugar secuencialmente, entonces puede ocurrir la disolución incongruente, con independencia de la temperatura del agua.

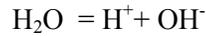
b) El pH del agua.

Un agua pura disuelve con facilidad sólo aquellos minerales solubles como los de tipo salino o los sulfatos. En la mayoría de los casos, sin embargo, la solubilidad de un mineral se incrementa considerablemente en presencia de ácidos; por ejemplo, en un litro de agua a 25 °C, sólo se disuelven 12 mg de calcita. En presencia de un ácido fuerte, sin embargo, la solubilidad aumenta de 25 000 a 30 000 veces.

La medida del grado de acidez del agua es el pH, el cual se define como el logaritmo inverso de la actividad del ion hidrógeno o hidronio (H⁺ o H₃O⁺), que resulta de la ionización de un ácido cualquiera; se expresa en moles por litro, aunque al medirse en equipos electrónicos con electrodos de referencia, la acidez se expresa en unidades de pH, por lo general entre 0 y 14, esta se calcula de la manera siguiente:

$$\text{pH} = -\log(\text{H}^+)$$

Aunque el agua pura está constituida fundamentalmente por moléculas de H₂O, una pequeña porción de la misma se compone de H⁺ y OH⁻. Esta proporción está controlada por la reacción de disolución:



En el agua pura (H⁺) = (OH⁻) = 10⁻⁷, por lo que teóricamente su pH debe ser 7. En la realidad, a causa de que ésta se encuentra en contacto con la atmósfera, es capaz de disolver CO₂ y adquirir un pH inferior a ese valor.

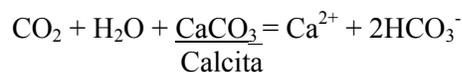
El valor del pH de muchas aguas naturales que interactúan con los minerales varía en un estrecho intervalo, por lo general entre 6 y 9, lo cual entre otras causas se debe a la gran distribución de las rocas carbonatadas y al carácter ácido-básico de las mismas, a través del sistema de equilibrios químicos que se establecen entre CO₂, HCO₃⁻ y CO₃²⁻.

Algunos manantiales calientes de origen volcánico poseen una elevada acidez, por la presencia de ácido clorhídrico (HCl), ácido sulfúrico (H₂SO₄) y dióxido de sílice (SO₂). Los ácidos libres también pueden pasar al agua como resultado del vertimiento de aguas residuales.

El agua de las precipitaciones al pasar por la zona del suelo, donde es abundante el CO₂, adquiere un pH relativamente bajo, del orden de 4,5. Luego por interacción con las rocas carbonatadas éste tiende a elevarse hasta cerca de 7. Cuando esta interacción se produce durante un tiempo prolongado el agua incrementa su contenido de iones HCO₃⁻ y adquiere además iones CO₃²⁻. En esas condiciones el pH puede alcanzar un valor cercano a 8,4. Por lo general, en los arroyos y ríos de las regiones húmedas no cársicas el pH varía entre 5 y 6,5; mientras que en las regiones cársicas húmedas este valor suele estar comprendido entre 7 y 8. Las aguas marinas tienden a poseer un pH cercano a 8. Las aguas minerales pueden poseer valores de pH ácidos, neutros o básicos de acuerdo a las características hidrogeológicas presentes.

c) Equilibrio de los carbonatos.

La disolución de los minerales constitutivos de las rocas carbonatadas comprende una serie de procesos físicos y químicos donde intervienen estados gaseosos, líquidos y sólidos a través de interfaces aire-agua-roca y un sistema de equilibrios químicos. Para el caso de la calcita, éstos se pueden resumir de la manera siguiente:



Lo más común en la naturaleza es que este proceso ocurra en presencia de otros minerales, principalmente dolomita, yeso y halita. Si en el proceso de disolución de los minerales carbonatados por las aguas naturales existe un suministro abundante de CO₂, que puede considerarse constante durante la reacción, éste procede rápidamente hasta la saturación. En este caso la reacción tiene lugar en condiciones de sistema abierto respecto al CO₂. Si por el contrario, la disolución de los carbonatos por las aguas naturales se produce en

virtud del suministro inicial de CO₂, que luego no se repone en el transcurso de la reacción, ésta se produce en condiciones de sistema cerrado respecto al CO₂.

En la naturaleza tienden a primar, tanto las condiciones de disolución de los carbonatos en sistema abierto como cerrado, o más bien de tipo intermedio entre sistema abierto y cerrado.

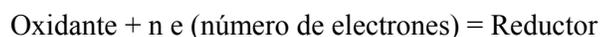
d) Efecto de ion común y efecto salino.

Cuando un agua natural pasa por un terreno donde existen minerales con iones comunes a los que ésta lleva disuelto en su seno, disminuye su capacidad para disolver esos minerales. Si se compara la solubilidad de los minerales en agua pura con la de un agua que contiene iones no comunes al proceso de disolución de ese mineral, se demuestra que la salinidad incrementa la solubilidad del mismo. Esto se debe a que, como consecuencia del incremento de la concentración, aumenta la fuerza iónica y se produce una disminución del coeficiente de actividad. Este fenómeno se denomina efecto salino o de fuerza iónica.

e) Potencial de oxidación-reducción.

Muchas reacciones químicas que tienen lugar en el medio acuático y en especial en el sistema de las aguas subterráneas, implican transferencia de electrones entre constituyentes disueltos, gases o sólidos. Como resultado de estas transferencias se producen cambios en los estados de oxidación-reducción de los reaccionantes y los productos.

Los elementos de valencia múltiples son susceptibles de intervenir en las reacciones de oxidación-reducción, mediante las cuales una molécula se reduce (oxidante) al tomar los electrones que le cede la otra (reductora), la cual se oxida. La reacción también es capaz de proceder en dirección contraria, de modo que este proceso se puede representar mediante la ecuación de equilibrio siguiente:



La fortaleza de una reacción de oxidación-reducción se mide por el potencial redox (Eh). El potencial de oxidación-reducción se mide en voltios, a través de milivoltímetros de campo es posible obtener este valor en las aguas naturales.

Aunque las soluciones acuosas no contienen electrones libres, también es conveniente expresar el proceso de oxidación-reducción mediante un par redox, como si estas reacciones se produjeran por separado.

Además, se suele utilizar la magnitud pE para describir la actividad relativa de los electrones. Por definición:

$$\text{pE} = - \log (e)$$

El pE es una magnitud adimensional análoga a la expresión pH, utilizada para describir la actividad del protón o ion hidrógeno. El pE de una solución mide su tendencia oxidante o reductora.

f) Intercambio iónico y adsorción.

Los materiales geológicos porosos están compuestos de un porcentaje apreciable de partículas de tamaño coloidal que tienen la capacidad de intercambiar iones adsorbidos en su superficie. Como resultado del proceso de intemperismo de las rocas por los agentes exógenos se originan los suelos, constituidos por minerales de tipo arcilloso. Estos minerales se subdividen en cinco grupos: caolinita, montmorillonita, ilita, clorita y vermiculita; los cuales se caracterizan por presentar tamaños de partículas del orden de los coloides, que originan procesos de intercambio iónico entre las arcillas de la zona del suelo y las aguas que discurren a través de las mismas.

Una vez analizados todos los factores, corresponde ahora el análisis a lo que la literatura conoce y define como composición química de las aguas minerales.

II.1.1.2 Composición química de las aguas minerales.

La composición química de las aguas es uno de los criterios sobre los que se basa el concepto de agua mineral. La concentración de sales disueltas en las aguas minerales tiene que ser, por fuerza, superior a 1 500 mg/l, límite reconocido para las aguas de distribución pública [47]. Dicha concentración es reconocida en la literatura consultada como mineralización de las aguas. Como composición química de las aguas se reconoce, por tanto, a los diferentes componentes de tal mineralización, los cuales pueden ser divididos en tres grandes grupos [11, 46, 47] :

- **Elementos mayoritarios:** normalmente entre ellos se consideran al calcio (Ca), magnesio (Mg), sodio (Na), potasio (K), carbonato (CO_3), bicarbonato (HCO_3), Sulfato (SO_4), Cloruro (Cl) y Nitrato (NO_3).
- **Elementos minoritarios:** dentro de ellos se consideran el hierro (Fe), el aluminio (Al), la sílice (SiO_2), el boro (B), fluoruros (F) y el selenio (Se). Esta subdivisión puede variar, considerando que el límite entre este grupo y el que sigue está dado por la concentración del elemento en cuestión en las aguas.
- **Elementos trazas:** dentro de ellos se consideran todos aquellos elementos que se encuentran en concentraciones muy bajas en las aguas.

No obstante lo anteriormente explicado, el análisis que se realiza en la presente Tesis sobre la composición química de las aguas minerales se va a enfocar, sobre todo en base a las principales propiedades geoquímicas, de los componentes más destacados de las aguas minerales [3, 8, 28, 31], sin atender a la división anteriormente señalada:

◆ *Cationes alcalinos.*

SODIO: por su fácil oxidación este elemento no se encuentra libre en la naturaleza, sino solamente en estado de combinación. Abunda en las rocas constituidas por silicatos complejos, que al desintegrarse pasan a formar compuestos solubles en agua. El sodio por constituir un 2.36 % de la corteza terrestre, figura en todas

las aguas minerales, y en muchas de ellas es el catión predominante.

POTASIO: se encuentra muy distribuido en la corteza terrestre, siendo su abundancia de un 2.4 %, con respecto al total de sólidos disueltos. En la naturaleza, el potasio, mayormente se manifiesta en forma de combinaciones. Acompaña siempre al sodio, aunque en muy baja proporción, si bien pueda ser algo mas altas en las aguas profundas.

LITIO: tiene una gran difusión en la naturaleza y se manifiesta, aunque en pequeñas cantidades, en diversas clases de rocas y materiales arcillosos. El litio es también frecuente en las aguas, pero de ordinario en muy baja concentración. En algunos manantiales, el contenido en litio puede ser considerable.

♦ *Iones alcalinotérreos.*

CALCIO: se encuentra muy extendido en la naturaleza, constituyendo aproximadamente el 3.5 % de la corteza terrestre. Forma parte de gran número de rocas y minerales y muchas aguas minerales, normalmente frías, a consecuencia de la acción de los agentes atmosféricos sobre las rocas.

MAGNESIO: aproximadamente el 2.2 % de la corteza terrestre está formada por magnesio, que a causa de su gran reactividad química no se presenta libre, sino combinado, formando minerales y rocas. El magnesio, como el calcio, es frecuente en las aguas, en particular en las procedentes de terrenos terciarios.

ESTRONCIO y BARIO: el estroncio y el bario suelen ser acompañantes del calcio, aunque siempre en proporciones muy bajas, ocurriendo lo mismo con el berilio.

♦ *Iones pertenecientes a los elementos de transición.*

HIERRO: el hierro es uno de los metales más abundantes en la corteza terrestre y constituye el 4.7 % de ella. En estado nativo sólo se encuentra en los meteoritos; por el contrario, se presenta con mucha frecuencia en minerales oxigenados y sulfurados. También se encuentra en las aguas minerales el hierro, pudiendo dar idea de la importancia de este componente el que basta un contenido de 5 ó 10 mg de ion ferroso por litro para que el agua se considere ferruginosa, prescindiendo de sus restantes componentes. Muchas de estas aguas son también carbónicas, puesto que aseguran la disolución y conservación del ion ferroso; pero este mismo hecho manifiesta la difícil conservación de las aguas ferruginosas.

MANGANESO: el manganeso suele acompañar al hierro en las aguas minerales, aunque su proporción sea siempre muy pequeña.

♦ *Otros cationes.*

El análisis espectrográfico ha permitido comprobar la presencia en las aguas minerales de un gran número de cationes, tales como el aluminio, la plata, el plomo, el bismuto, el cinc, el cadmio, el vanadio, etc., considerados "oligoelementos o microcomponentes".

◆ *Iones haluros.*

Se corresponden con los elementos pertenecientes al subgrupo B del grupo VII de la tabla periódica y su nombre deriva de halógenos (formador de sales), porque sus combinaciones metálicas tienen el carácter salino del tipo de sal común.

ION CLORURO: dentro de los haluros ofrece un gran interés el cloruro, que es un elemento de gran poder de reacción, por lo que no se presenta en la naturaleza en estado libre. Por el contrario se encuentra repartido en forma de combinaciones metálicas, constituyendo el 0.19 % de la corteza terrestre, incluyendo el agua de mar. Los cloruros se encuentran en las aguas, siendo las más ricas en ellos las procedentes de terrenos sedimentarios y especialmente de los terciarios, aunque también las aguas profundas suelen contenerlos, aunque en menor proporción.

IONES FLUORURO, BROMURO Y YODURO: el flúor no se encuentra libre en la naturaleza, dada su gran reactividad, pero combinado se haya ampliamente distribuido en las rocas que componen la parte sólida de la tierra y en el agua de mar (2 mg/l). El ion fluoruro solo se encuentra en proporciones considerables en las aguas eruptivas profundas, en tanto que bromuro y yoduro se encuentran en las aguas cuya mineralización es de origen lacustre. La acción de estos aniones es menos general y más selectiva.

◆ *Iones derivados del carbono.*

El carbono pertenece al grupo IV B de la tabla periódica, siendo un elemento fundamentalmente no metálico. Debido a los estados de oxidación que puede alcanzar forma dos series de iones:

CARBONATOS Y BICARBONATOS: en las aguas minerales es frecuente la presencia de estos componentes y de carbónico, dependiendo la relación entre unos y otros del pH, de la temperatura del agua, flora y otros muchos factores; de ahí su escasa estabilidad. En la literatura se suele considerar al bicarbonato y al carbonato como "alcalinidad" del agua.

◆ *Iones derivados del azufre.*

El azufre en sus diferentes formas iónicas, constituye uno de los más destacados factores mineralizantes de las aguas minerales. Su forma más frecuente es la oxidada en forma de sulfatos; pero también se puede encontrar en forma reducida como hidrógeno sulfurado y sulfhidratos.

◆ *Derivados nitrogenados.*

De los derivados nitrogenados del agua provienen fundamentalmente de los compuestos orgánicos o vegetales, pero en esencia, el nitrógeno, que es un elemento relativamente poco abundante en la superficie terrestre, proviene fundamentalmente de la atmósfera, de donde continuamente es extraído por los seres vivos, para realizar su metabolismo.

En un agua natural se encuentran, además del nitrógeno molecular disuelto, los compuestos nitrogenados siguientes: amoníaco, nitritos, nitratos y moléculas orgánicas nitrogenadas. Tales compuestos se encuentran, por lo general, en muy bajas concentraciones en las aguas minerales y su significación es escasa y acaso interesante, por poder ser indicio de contaminación.

◆ *Otros elementos.*

SILICIO: casi todas las aguas minerales contienen cantidades apreciables de silicio bajo forma de sílice libre coloidal o anión silícico, pudiéndose encontrar en cantidades considerables en ciertas aguas de origen profundo.

BORO: finalmente, se considerará en este lugar el boro, que con cierta frecuencia se encuentra en las aguas minerales, tanto en las profundas como en las superficiales, aunque siempre en muy bajas concentraciones, al estado de anión borato.

◆ *Gases.*

Diversos cuerpos gaseosos pueden figurar disueltos o simplemente incorporados en las aguas mineromedicinales, entre ellos el hidrógeno (H₂), oxígeno (O₂), dióxido de carbono (CO₂), sulfhídrico (H₂S), etc. El conocimiento de los mismos es interesante, ya que el hidrógeno indica un origen profundo, el oxígeno es siempre de origen aéreo, el carbónico suele ser propio de aguas profundas y muchas veces bicarbonatadas, llegando a constituir el grupo de aguas carbogaseosas, el sulfhídrico es propio de aguas sulfuradas, preferentemente cálcicas y pH ácido o cercano a la neutralidad, ya que por encima de 7,5 predominan los sulfhidratos. El nitrógeno, al que se le concedió hace años bastante interés, carece realmente de valor terapéutico, y algo parecido ocurre con los gases nobles o raros, que tienen mas interés hidrogeológico que terapéutico, puesto que no se les reconoce acción alguna destacable.

Otra concepto diferente es el de radioemanación o radón y aun incluso el torón y actinón, que confiere efectos radiactivos a las aguas que los contienen en suficiente cantidad.

◆ *Materia orgánica, microflora y microfauna.*

En las aguas minerales se puede encontrar materia orgánica en proporciones variables, pudiendo ser carente de organización u organizada. Su origen suele ser el terreno, facilitando su incorporación las peculiares condiciones de presión, temperatura, etc., del agua; pero también puede proceder de los detritos o residuos metabólicos de la flora autótrofa, ya que es rara la contaminación de las aguas profundas cuando son captadas y protegidas debidamente.

También es posible encontrar en las aguas minerales pequeñas cantidades de ciertos compuestos orgánicos que se engloban bajo la designación de materia húmica o ácidos húmicos, de estructura química mal conocida y que figuran en mayor proporción en los depósitos de determinadas fuentes naturales ricas en flora

autótrofa, residuos vegetales, algas, plancton, etc. Estos depósitos orgánico-minerales de consistencia mucilaginosas se denominan biogleas desde la conferencia de Dax de 1949.

Por lo que respecta a la materia orgánica organizada, y más concretamente a la flora hidromineral, esta integrada por un conjunto de especies macro y microscópicas en asociación compleja estrechamente relacionadas con la especial mineralización, temperatura, pH, luminosidad del agua, etc. Entre los microorganismos más frecuentes figuran las algobacterias verdes o clorofíceas, las algas azules o cianofíceas, diatomeas, y las directamente relacionadas con la mineralización, tales como las sulfobacterias que oxidan el sulfhídrico, sulfuros, sulfitos, etc., hasta liberar azufre que fijan en su protoplasma. Las ferrobacterias de las aguas ferruginosas que utilizan el hierro para cubrir sus existencias vitales; las manganobacterias, que precisan del manganeso; las halofitas, propias de las aguas cloruradas y también la flora termófila, que se encuentra en las aguas con temperatura superior a los 40 °C, a la que no sobreviven las especies ordinarias en las aguas superficiales.

La fauna de las aguas minerales es siempre escasa y rara vez alteran la composición de las mismas; pero se debe estudiar cuidadosamente pues aunque la mayoría de los flagelados, rizópodos, infusorios, rotíferos, crustáceos, etc., son inocuos también hay algunos que pueden ser alterantes desde el punto de vista sanitario.

Llegado a este punto se hace necesario introducir un grupo de conceptos y definiciones relacionadas con las aguas minerales y su clasificación y que de una forma u otra serán usados en el presente estudio.

II.1.1.3 Discusión teórica sobre conceptos y definiciones relacionados con las aguas minerales.

◆ *Agua Mineral.*

El concepto de agua mineral ha sido estudiado por diferentes autores a lo largo de muchos años, todo lo cual ha provocado la existencia de un sinnúmero de definiciones, las cuales pueden ser más o menos exactas, en dependencia de los factores considerados.

Grünhut, en 1911, estableció como condiciones para que un agua se considere mineral con relación a la Balneología y al comercio, el contener más de un gramo de sustancia sólida disuelta o bien componentes especiales en cantidades superiores a determinadas proporciones o temperaturas superiores a 20 °C [5, 6].

La Organización Mundial de la Salud (OMS), en 1969, consideró como agua mineral natural la bacteriológicamente incontaminada, procedente de fuentes subterráneas, con un mínimo de un gramo de mineralización por kilogramo o 250 mg de CO₂ libre, con propiedades favorables para la salud, según criterios admitidos por el Comité Coordinador de la FAO/OMS [5, 6].

Cadish en 1969 y Urbani en 1991 [22, 56], plantearon que un agua mineral es aquella con un residuo seco superior a 1 g/L, o que sin tener tal cantidad de residuo tenga más de 1 mg/L de litio; 5 mg/L de hierro; 10 mg/L de estroncio; 1 mg/L de yodo; 2 mg/L de flúor; 1,2 mg/L de sílice, etcétera. Si no se dispone de la

información sobre el residuo seco, se puede utilizar el total de sólidos disueltos (igual a la suma de aniones y cationes) en exceso a 1 g/L.

Según Manuel Armijo Valenzuela y Josefina San Martín Bacaicoa [5, 6], las aguas minerales naturales tienen su origen en un estrato o yacimiento subterráneo y brotan de un manantial en uno o varios puntos de alumbramiento, naturales o perforados. Plantean además que la temperatura, la mineralización y los parámetros característicos del agua deberán mantenerse constantes no debiendo verse afectados por posibles variaciones del caudal del manantial. Los citados autores consideran además que dichas aguas se diferencian de las restantes aguas naturales, por su naturaleza, caracterizada por su contenido en minerales, oligoelementos y, en ocasiones, por determinados efectos y por su pureza original.

Resulta también interesante el concepto dado por Ignacio Morell Evangelista [35], el cual considera como agua mineral aquella cuyo contenido en total de sólidos disueltos excede los 1000 mg/l y, en muchos casos, contiene constituyentes químicos particulares con supuestos valores terapéuticos.

◆ ***Agua mineromedicinal.***

Las aguas mineromedicinales se pueden definir, de una manera genérica, como un agua natural que puede ser utilizada directamente con fines terapéuticos. Son aquellas que ejercen una acción fisiológica positiva. Se distinguen de las otras aguas naturales por su origen, generalmente profundo, por su originalidad fisicoquímica, variedad, calidad y cantidad de materias disueltas, por su valor terapéutico, reconocido por los organismos oficiales, y por su pureza original [51].

La Organización Mundial de la Salud (OMS) las define como:... “agua bacteriológicamente incontaminada que procedente de una fuente subterránea natural o perforada, contiene una determinada mineralización y puede inducir efectos favorables para la salud, debiendo estar así reconocido por la autoridad pertinente del país de origen” [8].

En las aguas mineromedicinales es de enorme importancia considerar la cantidad total de sus factores mineralizantes (residuo seco), pero quizá más las distintas sustancias fijas disueltas. De la mineralización total dependen muchas propiedades, tales como sus efectos osmóticos, densidad, viscosidad, tensión superficial, etc.; pero la mayoría de sus efectos sobre el organismo, no meramente físicos, se relacionan con los componentes más destacables que llevan en disolución, entre los que figuran los cationes sodio, calcio, magnesio, potasio, litio, hierro, etc., y los aniones: cloruro, sulfato, bicarbonato, etc. [8].

En 1994, Manuel Armijo Valenzuela y Josefina San Martín Bacaicoa [5], definieron que las aguas mineromedicinales,...” son aquellas, que por sus especiales características se han acreditado oficialmente como agentes terapéuticos y han sido declaradas de utilidad pública por los organismos pertinentes”... Por otra parte los citados autores plantean que dado que el efecto terapéutico tiene que ser forzosamente dependiente de la especial composición y características del agua, es imprescindible que las aguas

mineromedicinales tengan una constancia comprobada y se mantenga perennemente en las condiciones del momento de su autorización oficial, constituyéndose en una entidad independiente sometida, exclusivamente, a sus propios cánones.

♦ *Agua Termal.*

Llegado este punto y antes de definir lo que se entiende por agua termal, los autores del presente trabajo han considerado importante definir primero, lo que se entiende por Gradiente Geotérmico y su influencia en el origen de los procesos generadores de calor en el interior de la tierra. Tales procesos son de obligada atención a la hora de interpretar los mecanismos de adquisición de la temperatura por parte de las aguas minerales.

Gradiente Geotérmico.

El Gradiente Geotérmico ha sido definido [35] como la profundidad de penetración en el suelo, expresada en metros, para que la temperatura aumente 1 °C. Su valor medio es de 30 - 35 metros, aunque dicho gradiente puede alcanzar valores de 10 - 15 metros en regiones volcánicas y hasta 60 - 80 metros en macizos graníticos. En las áreas de flujo bajo de calor los gradientes geotérmicos son del orden de 2 a 4 °C cada 100 metros, por lo que a profundidades entre 1.5 y 2.5 kilómetros se encuentran temperaturas de 60 a 90 °C (Sánchez, 1985) en [35]. En las áreas de flujo de calor anómalo el gradiente geotérmico alcanza valores de 15 a 30 °C cada 100 metros, por lo que a profundidades de 1.5 a 2 kilómetros se pueden encontrar temperaturas de 200 a 300 °C.

La profundidad mínima P de origen del agua viene dada por la fórmula:

$$P = (T_s - T)gT$$

donde:

T_s: temperatura media de la surgencia en °C.

T: temperatura media en la zona de emergencia en °C.

gT: gradiente geotérmico en metros.

Este proceso es el responsable de la temperatura que adquieren la mayoría de las aguas termales, pero existen otros factores secundarios que contribuyen a incrementar la temperatura de las aguas, tales como vulcanismo reciente, enfriamiento de magmas y ciertas reacciones físico-químicas, tales como reacciones exotérmicas y desintegración de minerales radioactivos.

Se considera como agua termal aquella que tiene una temperatura apreciablemente superior constante y superior a la temperatura media atmosférica local [35].

Dentro de la definición es importante plantear también el hecho comprobado de que toda agua termal es, necesariamente un agua mineral y ocurre que, con frecuencia, las aguas que en algún momento de su historia hidrogeológica han tenido temperaturas elevadas son, al mismo tiempo, minerales, debido a su prolongado tiempo de residencia y a su capacidad de interacción con la roca almacén [35].

◆ *Agua Termomineral.*

La denominación “agua termomineral”, aunque empleada frecuentemente, no responde a una definición precisa. Algunos autores agrupan bajo ese vocablo, todas las aguas que se distinguen por su temperatura o su mineralización (o las dos al mismo tiempo) y suelen identificarse directamente con las aguas del manto freático de una región dada [47]. Castany, en 1971 en [35] las definió como: “aguas naturales dotadas de propiedades terapéuticas particulares”. En la actualidad existe una denominación que tiende a relacionar el concepto de agua termomineral con el de agua mineral, aunque esto último no ha tenido gran aceptación en la comunidad científica y en general se considera preferible no usar el concepto [47].

Una vez definidos los principales conceptos que se relacionan con el estudio de las aguas minerales, corresponde ahora centrar la atención en las principales clasificaciones de las Aguas Naturales y Minerales.

II.1.1.4. Discusión teórica sobre métodos de clasificación de las aguas minerales.

La gran variedad de aguas minerales existentes ha hecho que su clasificación sea sumamente diversa. En la bibliografía existente se encuentran clasificaciones según origen, uso, temperatura, tonicidad, mineralización global, composición química, acciones fisiológicas, actividad terapéutica, caudal, etc.

◆ *Origen*

Según su Origen, Gautier ha dividido las aguas en superficiales y profundas [9]:

– **Superficiales**

De origen meteórico o marino. Esta agua penetran en el suelo hasta llegar a capas impermeables donde se acumulan en masas de mayor o menor volumen y desde donde surgen al exterior aprovechando grietas o fallas del terreno o, simplemente por desnivel. El agua al atravesar las distintas capas del terreno va captando minerales por disolución o incorporación.

– **Profundas**

Son consideradas como tal las de origen magmático o volcánico, siendo característica de estas aguas la presencia de elementos mineralizantes que evidencian tal origen.

◆ *Principales Usos*

Existen clasificaciones que intentan agrupar las aguas por su uso. En el caso específico de las aguas minerales, sus *Principales Usos* (Korin, 1994) se pueden esquematizar de la siguiente manera [35]:

– **Uso no energético:**

- Uso balneológico y terapéutico.
- Aguas de bebida.
- Suministro doméstico.

– **Uso industrial:**

- Uso energético.
- Calefacción.
- Uso agrícola.

En función del *Uso Potencial* del agua para calefacción o suministro eléctrico, se pueden distinguir los siguientes tipos de agua (Shpak et al. , 1994) en [35]:

- **Aguas de baja temperatura:** 20 a 100 °C.
- **Aguas de temperatura media:** 100 a 150 °C.
- **Aguas de alta temperatura:** mayor de 150 °C.

De las clasificaciones basadas en las propiedades físicas de las aguas, son destacables las que consideran la temperatura de las mismas. Las clasificaciones basadas en la temperatura del agua implican cierta complejidad, ya que en muchas áreas emerge más de un manantial siendo, con frecuencia, sus aguas distintas en composición y temperatura.

Desde el punto de vista de la *Temperatura*, la clasificación más sencilla es considerar aquella en que su aplicación no produce sensación de frío ni de calor que, con las variaciones de sensibilidad individual, se admite que es la comprendida entre 34 y 36 °C. Las aguas que presentan estas temperaturas se denominan mesotermiales, considerándose hipertermiales o hipotermiales según que temperatura se halle por encima o por debajo de dicho margen.

◆ *Temperatura*

Según de profesor Schoeller [13], para clasificar las aguas en dependencia de su Temperatura se hace necesario considerar la temperatura media anual del aire (Tma) o la temperatura del suelo (Ts) en que brotan el manantial, de ello se obtiene la siguiente clasificación:

- **Hipertermiales:** $T > T_{ma} + 4 \text{ °C}$ o $T > T_s + 2 \text{ °C}$.
- **Ortotermiales:** $T = T_{ma} + 4 \text{ °C}$ o $T = T_s + 2 \text{ °C}$.
- **Hipotermiales:** $T < T_{ma}$ o $T < T_s - 2 \text{ °C}$.

Desde el punto de vista *Hidroterapéutico* y en relación con la llamada *Temperatura Indiferente del Organismo*, resulta de interés la clasificación que establece que las aguas mesotermas son aquellas con temperaturas entre 35 y 37 °C, hipertermas (más de 37 °C) e hipotermas (menos de 35 °C) [9].

Con frecuencia se encuentran clasificadas las aguas, por su temperatura, como sigue (Castany, 1971) en [51]:

- **Frías:** menos de 20 °C.
- **Hipotermas:** entre 20 y 35 °C.
- **Mesotermas:** entre 35 y 45 °C.
- **Hipertermas:** de más de 45 y hasta 50 °C.

Esta clasificación es considerada universal y resulta la más aceptada.

◆ *Valores de la Presión Osmótica*

También ofrece considerable valor en terapéutica las clasificaciones basadas en los Valores de la Presión Osmótica (descenso crioscópico) de las aguas con relación a la de los fluidos orgánicos. Atendiendo a este criterio se establece la siguiente clasificación [9]:

- *Aguas hipotónicas: Δ inferior a -0.55 °C.*
- *Aguas isotónicas: Δ entre -0.55 y -0.58 °C.*
- *Aguas hipertónicas: Δ superior a -0.58 °C.*

◆ *Mineralización Global o Mineralización Cuantitativa*

Atendiendo a la Mineralización Global o Mineralización Cuantitativa, se han dividido las aguas minerales, atendiendo al residuo seco a 180 °C, en: aguas oligominerales las de menos de 0,2 g/l; mediminerales las que contienen entre 0,2 y 1 g/l, y minerales si sobrepasan 1 g/l [9].

◆ *Mineralización Predominante y Especial*

Las clasificaciones de mayor aceptación en todo el mundo son las basadas en la Mineralización Predominante y Especial que pueden contener las aguas. En todas ellas se considera la mineralización total, la predominante y también la especial, dándose carácter de predominante a aquellos aniones o cationes que representan más del 20 % de la masa iónica correspondiente, expresada en miliequivalentes [9].

Siguiendo estas normas, que podemos considerar internacionales, podemos clasificar las aguas minerales como sigue [8, 9]:

– **Aguas con más de un gramo por litro de sustancias mineralizantes.**

- **Cloruradas:** en las que el componente predominante es el cloruro, y siempre el sodio. La concentración en cloruro y sodio puede ser muy elevada. Las mismas pueden a su vez subdividirse en fuertes (más de 50 g/l), medianas (10-50 g/l) y débiles (menos de 10 g/l).

- **Sulfatadas:** en las que predomina el anión sulfato pero los restantes elementos le prestan características especiales. Estas a su vez pueden, en dependencia de la presencia de otros aniones o cationes variar su nombre y denominarse: sulfatadas sódicas, sulfatadas Magnésicas, sulfatadas cálcicas y mixtas, que a su vez pueden ser sulfatadas cloruradas y sulfatadas bicarbonatadas.

- **Bicarbonatadas:** en las que predomina el anión bicarbonato, pero también el sodio. Las mismas en dependencia del contenido de aniones y/o cationes pueden ser bicarbonatadas sódicas, bicarbonatadas cálcicas o mixtas.

Muchas aguas bicarbonatadas se denominan también carbónicas, por contener cantidades relativamente elevadas de ácido carbónico libre; pero si este contenido supera los 250 mg del carbónico natural se denominan carbogaseosas o aciduladas.

– **Aguas con factores mineralizantes especiales.**

- **Sulfuradas o sulfúreas:** en las que la característica fundamental es el contenido azufrado reducido, pero en las que se pueden diferenciar tres agrupaciones según sus componentes: Sódicas, Cálcicas y Cloruradas.

- **Ferruginosas:** en las que lo destacable es el contenido en hierro reducido, que, según las taxonomías, debe superar los 5 ó 10 mg/l.

- **Radiactivas:** por su contenido en radón y que debe superar unos mínimos establecidos diferentes en cada país.

– **Aguas con mineralización inferior a un gramo por litro.**

En ellas la mineralización es inferior a 1 g/l, admitiéndose los subgrupos de débil mineralización (menos de 0.2 g/l) y de mediana mineralización (0.2-1 g/l), pero sin considerárseles factores mineralizantes especiales. En este último grupo, atendiendo a su temperatura, pueden admitirse dos grupos principales:

- **Acratopegas:** con menos de 20 °C.

- **Acratotermas:** con mas de 20 °C.

♦ **Clasificación hidroquímica de las aguas minerales.**

Dentro de las clasificaciones basadas en los criterios químico-físicos de las aguas minerales, ocupan un lugar importante aquellas que han sido denominadas como clasificaciones hidroquímicas. Las mismas se basan en el contenido de los iones más abundantes. En la literatura aparecen numerosas clasificaciones que responden

a diferentes objetivos (García, 1988; Catalán, 1988; Fagundo, 1996) en [22]. De su análisis se puede considerar como más ventajosas las siguientes:

- **Clasificación de Alekine.**
- **Clasificación de Shchoukarev.**
- **Clasificación de Kurlov.**
- **Clasificación de Palmer.**
- **Clasificación de Schoeller.**

De todas ellas el método de clasificación más utilizado es el de Kurlov, el cual toma en consideración los aniones y cationes que exceden el 20 % de meq/L, de lo cual se obtiene que:

- **En relación con los aniones:**

- Aguas bicarbonatadas.
- Aguas sulfatadas.
- Aguas cloruradas.
- Aguas bicarbonatadas sulfatadas.
- Aguas bicarbonatadas cloruradas.
- Aguas sulfatadas cloruradas.
- Aguas sulfatadas cloruradas bicarbonatadas.

- **En relación con los cationes:**

- Aguas cálcicas.
- Aguas magnésicas.
- Aguas sódicas.
- Aguas cálcicas magnésicas.
- Aguas cálcicas sódicas.
- Aguas magnésicas sódicas.
- Aguas cálcicas magnésicas sódicas.

Una variante del método de Kurlov se ha propuesto por Fagundo en [22] sobre la base de las relaciones estequiométricas entre $\text{Na}^+ + \text{K}^+ : \text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+} : \text{Cl}^- : \text{HCO}_3^- : \text{SO}_4^{2-}$. El método, por su importancia como método de reconocimiento de patrones, será discutido más adelante dentro del trabajo.

II.1.1.5 Aspectos recogidos en las normativas cubanas relacionados con las aguas minerales.

Las normativas cubanas [40], establecen que un agua mineral es el agua de origen natural, cuyas características físicas, químicas y microbiológicas, con caudal determinado, son estables durante el ciclo hidrológico y cumplen con los requerimientos higiénico sanitarios establecidos. En la norma se establece que a las aguas minerales también se les conoce como aguas termales.

Dentro de las normativas se establece que: Las aguas minerales poseen una constancia probada con relación a la temperatura, el caudal, la microflora (saprofítica) y la composición química. Las aguas minerales deben poseer más de un gramo de minerales disueltos por Kg de agua o bien componentes especiales por cantidad superior a determinadas proporciones, también se establecen restricciones con relación a temperatura y no deben poseer gérmenes patógenos.

Los mismos documentos plantean además que las aguas minerales según sus usos, se dividen en cuatro tipos [39, 40, 41]:

◆ ***Agua mineral natural.***

Es aquella que se diferencia claramente de la potable y que proviene directamente de fuentes naturales o perforadas de agua subterráneas procedentes de rocas acuíferas. Esta agua contiene determinadas sales minerales y/o oligoelementos u otros constituyentes necesarios para el metabolismo humano con una composición, caudal y temperatura constantes, teniendo en cuenta los ciclos de las fluctuaciones naturales.

Este concepto se corresponde con el de agua mineral discutido en el acápite 3.1.

◆ ***Agua mineral medicinal.***

Es aquella que por su composición y características propias puede ser utilizada con fines terapéuticos, desde el área de emergencia hasta el lugar de utilización, dadas sus propiedades curativas demostradas por: analogía con similares tipos de agua existentes, por experiencia local, por estudios correspondientes o mediante ensayos clínicos y evaluación de procesos específicos de experiencia médica comprobada, así como conservar, caso de ser envasada, sus efectos beneficiosos para la salud humana.

Este concepto se corresponde con el de agua mineromedicinal discutido en el acápite 3.2.

◆ ***Agua mineral termal.***

Es aquella cuya temperatura de surgencia debe ser superior al menos en 4 grados centígrados, a la media anual ambiental del lugar donde emergen, permitiendo usar su acción calorífica.

Este concepto se corresponde con el de agua termal discutido en el acápite 3.3.

◆ ***Agua mineral industrial.***

Agua mineral que por su composición (cuantitativa y cualitativa) permite un aprovechamiento racional de los minerales que contiene.

Las normativas establecen los requisitos cuantitativos para las aguas minerales, los cuales se refieren a los tres aspectos fundamentales de su distinción: la mineralización, la temperatura y los componentes bioactivos.

Con respecto a la *Mineralización* se establece lo siguiente:

Mineralización	Rango de valores para estimar
De baja mineralización	menor de 0,2 g/l de sólidos totales.
De mineralización media	entre 0,2 y 1,0 g/l de sólidos totales.
De alta mineralización	mayor que 1,0 g/l de sólidos totales.

Con respecto a la *Temperatura* se establece lo siguiente:

Temperatura	Rango de valores para estimar
Hipotermales:	menor de 4 °C con respecto a la temperatura media anual.
Mesotermales:	aproximadamente igual a la temperatura media anual.
Hipertermales:	mayor de 4 °C con respecto a la temperatura media anual.

Con respecto a los *Componentes bioactivos* se establece lo siguiente:

Componentes	Concentración
H₂S	Mayor o igual a 1.0 mg/l
CO₂	Mayor o igual a 250.0 mg/l
Li	Mayor o igual a 1.0 mg/l
Sr	Mayor o igual a 10.0 mg/l
Ba	Mayor o igual a 5.0 mg/l
Fe⁺²	Mayor o igual a 5.0 mg/l
Br	Mayor o igual a 4.0 mg/l
I	Mayor o igual a 1.0 mg/l
As	Entre 0.2-0.3 mg/l
F	Entre 1.0-2.0 mg/l
H₃BO₃	Mayor o igual a 4.0 mg/l
H₂SiO₂	Mayor o igual a 50.0 mg/l
Rn	Mayor o igual a 1.82 nCi/l

Como parte de la recopilación bibliográfica realizada se obtuvo un volumen extra de información sobre conceptos y definiciones y métodos de clasificación relacionados con las aguas naturales y minerales, las cuales, por motivos de espacio y estructura de la tesis, no fueron recogidos dentro de la misma. El Anexo I ofrece un Glosario de términos y definiciones importantes en el estudio de las aguas minerales, como apéndice del Capítulo II de la presente Tesis.

II.1.2 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.

II.1.2.1 Inventario de los sectores en estudio.

En el territorio cubano y teniendo en cuenta la existencia de los principales factores del medio físico-geográfico que influyen en la formación de las aguas minerales; estructura geológica, relieve, clima e hidrografía, se originan condiciones que favorecen la ocurrencia de yacimientos de aguas minerales, los cuales están distribuidos a todo lo largo y ancho de la isla y que forman parte de diferentes ambientes geológicos de formación. Dichos yacimientos pueden ser estudiados, a partir de las características de las surgencias naturales (fuentes hidrominerales) que en ellos existen. El estudio de un sector hidromineral específico, puede enfocarse tanto desde el punto de vista de las condiciones concretas del origen de las aguas, como desde el punto de vista de los ambientes físico-geográficos en que estas brotan.

En la tesis fue elegida como área de estudio el Distrito Físico-Geográfico Pinar del Río, ya que el mismo constituye una de las regiones del país con mayor grado de estudio de las aguas minerales, lo cual aporta un importante volumen de información a procesar. Dentro del distrito e independientemente del grado de estudio que tuviera una zona dada, se decidió estudiar las fuentes de aguas minerales sin tener en cuenta la clasificación técnico-económica que los subdivide en yacimientos, manifestaciones, etc. y si la localización real de las mismas en un sector determinado, lo cual permitió definir, para el uso exclusivo dentro de la presente Tesis, del siguiente concepto:

- Sector Hidromineral: constituye un espacio de terreno de la corteza terrestre, sin límites definidos y/o variables, que agrupa a un conjunto de fuentes de aguas minerales y pozos, correspondientes a un mismo yacimiento, manifestación, etc. Las mencionadas fuentes y pozos, dentro de los límites del sector, pueden o no poseer la misma composición químico-física.

Los sectores hidrominerales en estudio, están distribuidos de oeste a este, a lo largo de 150 Km, aproximadamente, desde el poblado de Arroyos de Mantua hasta el límite con la provincia La Habana y se nombran:

1. Sector hidromineral Zequeira.
2. Sector hidromineral Los Portales.
3. Sector hidromineral Aguas Claras.
4. Sector hidromineral San Vicente.
5. Sector hidromineral Cueva de los Portales.
6. Sector hidromineral San Diego de los Baños.
7. Sector hidromineral Bermejales.

8. Sector hidromineral El Sitio.
9. Sector hidromineral Mil Cumbres.
10. Sector hidromineral Cajálbana.
11. Sector hidromineral Pan de Guajaibón.
12. Sector hidromineral Rancho Lucas.
13. Sector hidromineral Cacarajícara.
14. Sector hidromineral Pozo Azul.
15. Sector hidromineral Rancho Mar.
16. Sector hidromineral Soroa.
17. Sector hidromineral Las Terrazas.

En la figura 1 se muestra la ubicación de los sectores hidrominerales dentro del Distrito Físico-Geográfico Pinar del Río. El mapa, que se presenta en la figura 1, así como los restantes mapas que se presentan en la Tesis fueron confeccionados con ayuda del programa Mapinfo [30].

II.1.2.2 Recopilación de la información analítica.

La información analítica base del estudio fue obtenida, fundamentalmente, a partir de los informes de exploración geológica para las aguas mineromedicinales en la Provincia de Pinar del Río [17, 21, 44, 44, 45, 48]. La información obtenida no resultó homogénea, ya que dependía del estadio dentro de la investigación geológica del área en cuestión, así como del grado de profundidad alcanzado en la investigación realizada; no obstante se pudo obtener un total de 361 series de datos, con los que se procedió a realizar el estudio propuesto en el presente proyecto. Los datos iniciales fueron obtenidos en miligramos por litros. Con posterioridad la información inicial fue complementada con resultados analíticos derivados de estudios actuales realizados por el CENTERVISA

♦ *Procesamiento y corrección de los datos.*

Las Bases de Datos iniciales fueron creadas con el programa Hidrowin [12], el cual permitió además hacer la corrección de los mismos, a través del uso del módulo Reports (General), el cual calcula el Balance Iónico para cada una de las muestras.

Para establecer el Balance Iónico es necesario utilizar los contenidos en miliequivalentes por litros de los iones mayoritarios en las aguas [4]. La concentración en miliequivalentes de un ion dado se calcula dividiendo su concentración en miligramos por litros por su peso equivalente. El balance iónico es muy útil al realizar un control de los resultados analíticos, puesto que para aguas con un pH cercano a 7, la suma de los

aniones, expresados como concentración de miliequivalentes, debe corresponder, lo más exactamente posible, con la suma de los cationes expresada de la misma manera [4]. La posible diferencia de ambos resultados no debe superar los 0.3 meq, para concentraciones aniónicas y catiónicas del orden de 6 meq, un 5 %. Cuando se alcanzan los 60 meq, no se debe superar 1 meq, un 6 %. Si la diferencia supera estas cifras, hay que proceder a verificaciones analíticas, lo cual significa que los datos no deben ser utilizados. De esta forma, de los datos originales fueron rechazados 41 series (16 %).

El propio programa Hidrowin permitió la conversión de los datos originales en miligramos por litros a otras unidades necesarias para el posterior procesamiento de los datos. Con posterioridad fueron creadas bases de datos, con ayuda del programa Excel [32], lo cual facilitó futuros tratamientos realizados. El Anexo II ofrece la totalidad de las series de datos obtenidos y corregidos, según se explica con anterioridad, expresados en miligramos por litros.

II.1.2.3. Niveles de estudio y métodos aplicados en la investigación.

La Investigación realizada se organizó en dos niveles de aproximación al problema:

Primer Nivel (a escala regional): donde se procedió a la caracterización de todos los sectores hidrominerales del Distrito Físico-Geográfico Pinar del Río y al uso de diferentes Métodos de Clasificación de las aguas Minerales, a lo cual se adicionó la aplicación de Métodos de Reconocimiento de Patrones Hidrogeoquímicos. Posteriormente se hizo un análisis sobre la distribución de los sectores dentro las unidades de la Regionalización Físico-Geográfica y Paisajística en el Distrito Pinar del Río. Finalmente se procedió a la determinación del origen de la composición química de las aguas subterráneas mediante la aplicación de Modelos de Balance de Masas para cada sector.

Segundo Nivel (a escala local): en el cual se procedió a caracterizar las fuentes hidrominerales del Sistema Hidrotermal San Diego de los Baños-Bermejales desde el punto de vista hidroquímico, a través de la aplicación de Métodos de Reconocimiento de Patrones, de la determinación del origen de la composición química de las aguas subterráneas mediante Modelos de Balance de Masas, de la aplicación de los métodos de la Estadística Multivariada, del estudio de las Condiciones de Equilibrio Termodinámico respecto a diferentes minerales y de la aplicación de métodos para Estimar la Temperatura y Yacencia de Acuíferos Profundos y los procesos de Mezclas de Aguas, todo lo cual posibilitó el establecimiento de Modelos Geoquímicos y Geotérmicos para el sistema hidrotermal.

Los sistemas hidrotermales han sido objeto de estudios hidrogeológicos e hidroquímicos en esta última década, con el objetivo de evaluar el potencial geotérmico existente en cada país para fines energéticos, de embotellamiento de agua mineral, así como de explotación balneológica y recreativa. Las aguas minerales de las fuentes del sector San Diego de los Baños han sido estudiadas desde el punto de vista terapéutico (Santamarina, 1948; Rodríguez, 1998) [23], hidrogeológico (Peláez, 1990) [45] y de caracterización químico-física (Embil, 1946-47; Embil y Trelles, 1947; Guerra, 1947a y b; López-Rendueles et al., 1949;

Santana, 1987) [22], por su parte las aguas minerales de las fuentes del sector Bermejales, situado a unos pocos kilómetros y con una composición similar, han sido menos estudiadas (Trelles, 1948) [55]. Sin embargo, no se ha realizado hasta el presente un estudio de tipo hidrogeoquímico encaminado a esclarecer los procesos geoquímicos que tienen lugar en los citados sectores y su relación con las propiedades químico-físicas de las aguas presentes. Esto último justifica la importancia del estudio que se realiza en el sistema hidrotermal San Diego de los Baños-Bermejales.

En el procesamiento realizado, a diferencia de otros sectores, fueron incluidos datos sobre la composición química de las aguas en profundidad, todo ello para complementar el análisis a realizar.

♦ *Métodos de Caracterización y Clasificación de las aguas de los sectores en estudio.*

A partir del estudio teórico-metodológico realizado, fueron seleccionados como criterios clasificatorios más válidos los siguientes:

- Clasificación de Castany (1971), para la clasificación de las aguas desde el punto de vista de su temperatura.
- Clasificación de Armijo Valenzuela y San Martín Bacaicoa (1994), para la clasificación de las aguas desde el punto de vista de su mineralización global o cuantitativa.
- Clasificación de Armijo Valenzuela y San Martín Bacaicoa (1994), para la clasificación de las aguas desde el punto de vista de su mineralización predominante y especial.
- Clasificación de Kurlov, para la clasificación de las aguas desde el punto de vista hidroquímico. En este caso el criterio clasificatorio fue apoyado por el uso de diagramas de Piper-Hill, para la representación de la composición química de las aguas [33]. El propio diagrama de Piper-Hill fue utilizado, dentro del análisis de cada sector, para llegar a conclusiones sobre el origen de las aguas, según lo planteado por Cerón García et al (1993) en [14].
- Clasificación de Korin (1994), para la clasificación de las aguas desde el punto de vista de sus uso.

El resto de las clasificaciones discutidas, resultan de menor interés o requieren de criterios extra para ser aplicadas y en otros casos no satisfacen los objetivos de la presente tesis. Los criterios discutidos relacionados con las normativas cubanas, en gran medida recogen y repiten ideas y conceptos dados por autores de reconocida fama internacional (Castany, 1971; Armijo Valenzuela y San Martín Bacaicoa, 1994) en [9, 35] y aunque dichos criterios resultan válidos, los autores de la presente tesis decidieron no considerarlos.

♦ *Métodos de Reconocimiento de Patrones Hidrogeoquímicos.*

Debido a la estabilidad relativa de la composición química de las aguas minerales, los métodos de reconocimiento de patrones constituyen una herramienta prometedora para el análisis de los tipos de aguas presentes en un sistema hidrotermal, sus posibles cambios y sus orígenes. En el campo de las aguas minerales, el empleo de estos métodos de reconocimiento de patrones han permitido establecer diferencias

hidroquímicas en distintas fuentes (Sánchez et al., 1996; Tillán et al., 1995) en [23].

Entre estos métodos, el propuesto por Fagundo [23] ha mostrado gran utilidad para la interpretación de los procesos geoquímicos que tienen lugar en el medio acuático y para el control de la calidad de las aguas mediante métodos basados en modelos hidrogeoquímicos (Fagundo, 1996; Fagundo y Rodríguez, 1991) en [23].

En el método mencionado en el párrafo anterior, la composición química es expresada en términos de tanto por diez, lo cual se logra dividiendo por 10 la concentración expresada en porcentaje de meq/l y luego redondeando a números enteros entre 1 y 8. Según esta notación, cada patrón se expresa mediante un juego de seis números enteros (tres para los aniones y tres para los cationes), ordenados según la secuencia: $\text{Na}^+ + \text{K}^+ : \text{Ca}^{2+} : \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^- : \text{HCO}_3^- : \text{SO}_4^{2-}$. De esta forma se pueden crear hasta $27 \times 27 = 729$ combinaciones numéricas o patrones hidrogeoquímicos (ver tabla 1). La operación de clasificación de los datos y la representación gráfica de los patrones (diagramas de Stiff), se realiza mediante un sistema automatizado, el cual además realiza la clasificación hidroquímica por el método de Kurlov [33], obteniéndose diagramas de Stiff [12, 54], para cada fuente de aguas minerales, donde se observa claramente la composición aniónica y catiónica de las mismas.

♦ ***Determinación del origen de la composición química de las aguas subterráneas mediante modelos de Balance de Masas.***

El cálculo del balance de masas es de gran utilidad a menudo, para la identificación de reacciones que pueden explicar diferencias en la química de las aguas a lo largo de su trayectoria, tanto para reacciones de intemperismo de los silicatos, como para carbonatos, reacciones de oxidación-reducción, etc. En ocasiones estos cálculos constituyen el primer paso en la elucidación de los procesos geoquímicos, antes de considerar las aproximaciones más complejas de la modelación del camino de reacción (Appelo y Postma, 1993) en [2]. No obstante se deben tener en cuenta las siguientes limitaciones:

Las soluciones de las ecuaciones de balance de masas no son necesariamente únicas. Diferentes bases de datos seleccionadas pueden dar iguales esquemas de reacciones consistentes.

No existen restricciones en las ecuaciones de balance de masas. Los cálculos de estas ecuaciones pueden servir para predecir reacciones imposibles, como precipitación de plagioclasa a baja temperatura o precipitación de gibbsita cuando la caolinita es la fase estable.

Los métodos de balance de masas han sido utilizados para estimar la fracción de masa extraída de la roca por la acción de la lluvia, que pasa a las aguas superficiales y subterráneas durante el proceso de intemperismo (Garrels y Mackenzie, 1967) en [25]. También, este tipo de aproximación ha encontrado aplicación para establecer los cambios producidos en las aguas, las divisiones existentes dentro de un mismo acuífero y para identificar proceso de mezclas de aguas por efecto de la explotación de una red de pozos [25].

El procedimiento de cálculo utilizado en la presente tesis, implementado en el programa MODELAGUA [24], para la estimación de los procesos geoquímicos que originan la composición química de las aguas estudiadas se detalla a continuación:

En el caso de aguas subterráneas someras (acuíferos colgados y de la zona no saturada) se calcula primero la masa extraída por la lluvia, tomando en consideración el factor de evapotranspiración, a través de la formulación:

$$f = \frac{\text{contenido medio de Cl}^- \text{ medido en la fuente}}{\text{contenido medio de Cl}^- \text{ en el agua de lluvia}}$$

El valor del numerador se toma a partir de la concentración media de Cl⁻ determinada en todas las fuentes de la región, la cual no debe estar influenciada por aportes procedentes de la disolución de la halita o de fuentes hidrotermales. Este factor es válido calcularlo a partir del Cl⁻, debido a la poca variación de su composición, como resultados de los procesos de interacción agua-roca en la zona no saturada del acuífero.

El producto del factor calculado por la media de la composición química del agua de lluvia para cada elemento o compuesto estudiado y a su vez restado de la media de la composición química del agua para cada elemento o compuesto estudiado, en una fuente dada, permite obtener el llamado delta iónico (Δ iónico).

$$\Delta \text{ iónico} = f \times C \text{ media lluvia} - C \text{ media fuente}$$

El delta iónico resulta una correspondencia de la masa resultante en el balance, la cual es debida al intemperismo (Appelo y Postma, 1993) en [2]. En el caso de presencia de gases disueltos (CO₂ y H₂S), no se tiene en cuenta el factor f.

Por su parte en el caso de manantiales procedentes de acuíferos de la zona saturada (fuente permanente) el cálculo se realiza restando de la composición química media (para cada elemento o compuesto calculado) de la fuente en estudio, la composición química media (para cada elemento o compuesto calculado) de la fuente procedente de la zona no saturada del acuífero. En el caso de no disponer de la información necesaria, el cálculo de la zona saturada se puede realizar a partir del valor de la masa de agua de lluvia, tomando como factor de evapotranspiración el correspondiente a otra zona de composición litológica similar.

♦ ***Métodos de estadística multivariada.***

El análisis estadístico multivariado tiene la propiedad de reunir y sintetizar grandes conjuntos de datos y variables, en función de ciertos objetivos, con el fin de obtener informaciones sólidas, que permitan una mejor comprensión del fenómeno objeto de estudio. En las Ciencias de la Tierra estos métodos han sido denominados geomatemáticos por algunos investigadores. Su aplicación en la Hidroquímica ha permitido determinar el comportamiento de los acuíferos cársicos (Valdés et. al. ,1981) en [22] y de otros tipos de acuíferos ante ciertas acciones externas (Pulido-Bosch, 1989; Dimitrov et. al. ,1993) en [22]. En el caso de las aguas minerales, su empleo ha facilitado la interpretación del comportamiento hidroquímico de los

manantiales termominerales (López-Chicano y Pulido-Bosch, 1996) en [22]. En uno u otro caso, se han podido estimar modelos de comportamiento, transformar las variables y reducir dimensionalidad, comprobar o rechazar hipótesis y dar respuesta a diferentes aspectos de carácter práctico.

Entre los métodos de análisis multivariado, se destacan los siguientes [10, 16]:

- **Análisis de cluster o de enjambres:** para agrupar las variables hidroquímicas que tienen características similares. Este método consiste en seleccionar las mayores similitudes (correlaciones) entre parejas de variables. De esta manera, se forman las primeras parejas que presentan una mayor similitud entre las mismas. A continuación se genera una nueva matriz de similitud que ya incluye las agrupaciones previas, como si se tratara de una sola variable. Una vez agrupadas todas las variables, el gráfico que resulta (dendograma) permite visualizar en forma rápida los grupos de variables afines y distinguirlos de aquellos que apenas guardan relación con el resto.
- **Análisis factorial:** con el objetivo de encontrar nuevas variables (denominadas factores), que serán una combinación lineal de las primeras y permiten estudiar con más facilidad, y sin pérdida significativa de la información original, el fenómeno a analizar, su estructura, y evidenciar relaciones entre variables, entre relaciones, o entre ambas. El procedimiento en el análisis factorial parte de la obtención de n autovalores y autovectores (componentes principales) de la matriz $n \times n$ correlaciones y de la estimación de la fracción de la varianza total de los datos explicados por cada uno de tales componentes (Pulido-Bosch, 1989) en [49]. Para interpretar mejor los factores se puede ejecutar en éstos una rotación varimax, mediante la cual las variables originadas son proyectadas sobre los ejes. Esta operación no modifica la varianza explicada por los factores antes de la rotación.

Como parte del estudio realizado se estudiaron las series de valores representativos de la composición químico-física de las aguas del sistema hidrotermal San Diego de los Baños-Bermejales, a través de los métodos anteriormente explicados. Los tratamientos de las series de datos fueron realizados con ayuda de los programas de computación STATGRAPHICS [52] y STATISTICA [53].

◆ ***Condiciones de equilibrios termodinámicos de las aguas con respecto a diferentes minerales.***

En los estudios hidroquímicos relacionados con las aguas subterráneas, es conveniente conocer el estado en que se encuentran las mismas con respecto al equilibrio químico con los diferentes minerales, esto es, si el agua se encuentra subsaturada, saturada o sobresaturada con respecto a los minerales con los cuales ella interactúa. Esta información permite evaluar si el agua, en un determinado momento de su trayectoria, está en capacidad de disolver más mineral, si ha perdido esta capacidad o si es capaz de ceder el exceso de minerales disueltos.

A partir del sistema de equilibrio de los carbonatos se han deducido las expresiones que permiten calcular la capacidad que posee un agua natural para disolver o precipitar minerales (Langmuir, 1971; Back et al, 1966; Fagundo, 1996) en [22]. En forma general, estos índices se suelen expresar mediante la expresión:

$$IS = \frac{\log K_{IAP}}{K_{eq}}$$

donde:

IS: índice de solubilidad.

K_{IAP} : Producto de actividad iónica.

K_{eq} : Constante termodinámica de equilibrio mineral.

Y de ello se deduce que:

- Si $IS = 0$, las aguas se encuentran en equilibrio termodinámico, esto es, saturadas con respecto al mineral de referencia y no poseen capacidad para seguir disolviendo más dicho mineral.
- Si $IS < 0$, las aguas se encuentran subsaturadas con respecto al mineral y están en capacidad de seguir disolviéndolo.
- Si $IS > 0$, las aguas se encuentran sobresaturadas con respecto al mineral y no están en capacidad de seguir disolviéndolo.

Estos cálculos, en la práctica resultan muy complejos, facilitándose su ejecución aplicando programas de computación basados en modelos químico-físicos y de especiación, tales como WATEQ (Truesdell y Jones, 1973; WATESPEC (Wigley, 1977), SAPHIQ (Alvarez y Fagundo, 1991), HIDROWIN (Calmbach, 1995), HIDROGEOWIN (Alvarez et al, 1999) y otros en [23]. En la presente tesis fueron estudiadas las condiciones del equilibrio termodinámico de las aguas del sistema hidrotermal San Diego de los Baños-Bermejales, a partir del cálculo de los índices de saturación, para diversos minerales [12], lo cual permitió definir la capacidad actual de las aguas para disolver o no diversas fases minerales.

Los estados de saturación de las aguas subterráneas han sido objeto de estudio de muchos investigadores (Back et al., 1966; Wigley y Plummer, 1976; Back et al., 1986; Fagundo et al., 1993; 1996) [23].

Por lo general, las aguas de las zonas no saturada y de alimentación de los acuíferos, son agresivas (subsaturadas), poseen capacidad para disolver minerales. A medida que se mueven en sentido horizontal o vertical van disolviendo más minerales hasta alcanzar la saturación y la sobresaturación. En dependencia de la solubilidad y disponibilidad en el terreno de los diferentes minerales presentes, las aguas pueden llegar a saturarse con respecto a uno de ellos, y sin embargo, poseer aún capacidad para disolver otros minerales. Como resultado de su largo recorrido y de interacciones de tipo agua-roca, las aguas minerales en las surgencias, suelen encontrarse en equilibrio termodinámico con respecto a la mayoría de los minerales presentes (Cerón et al., 1993) [14].

Una vez alcanzado el equilibrio químico, las aguas naturales y minerales pueden seguir disolviendo más minerales si éstas se mezclan con otras aguas que poseen diferentes presiones de vapor o mineralización. La disolución por mezcla de aguas fue reportada por primera vez por Bögli (1971) [23], para explicar los procesos de corrosión química en las cuevas y acuíferos cársicos.

El efecto de mezcla de aguas juega un importante papel en el proceso de adquisición de la composición química de las aguas minerales. En la zona saturada de los acuíferos profundos y confinados, las aguas suelen encontrarse saturadas con respecto a los minerales, dadas las condiciones de mineralización y presiones gaseosas presentes. Al mezclarse con otras que poseen diferente concentración iónica y gaseosa, se hacen de nuevo agresivas y disuelven más minerales. En muchos casos, el incremento de la composición química no es proporcional a las porciones de mezcla de los miembros que participan en la misma, debido al carácter no lineal de las curvas de solubilidad de los respectivos minerales (Fagundo, 1996; Morell, 1998) [23].

♦ *Estimación de la temperatura y yacencia de los acuíferos profundos.*

– *Teoría de los Geotermómetros.*

Los estudios de termometría hidroquímica pretenden conocer la temperatura a la que se encuentra el fluido termal en profundidad. Realmente, lo que se mide es la temperatura del último equilibrio termodinámico entre agua y roca, en caso de que éste se haya producido. Este equilibrio suele tener lugar en el tramo distal del acuífero que actúa como almacén geotérmico. No obstante lo anterior se considera que el uso de los geotermómetros debe ser razonablemente crítico [35, 56].

El principio básico de los geotermómetros es aplicar una reacción entre el agua y una o varias fases minerales, que sea solo función de la temperatura y cuya termodinámica sea perfectamente conocida hasta la temperatura en la que el agua alcanza su punto crítico. En este caso, la solubilidad o la relación de solubilidades entre las referidas fases minerales, reflejada en el análisis del agua, permite determinar las condiciones térmicas en las que se ha producido la reacción de equilibrio [35, 56].

– **Aplicación de métodos geotérmicos.**

La utilización de geotermómetros implica una serie de supuestos previos que deben verificarse (Fournier, White, Truesdell, 1974) en [35, 56]:

Las reacciones entre el agua y la fase mineral que se investiga deben ser función de la temperatura.

Todos los elementos reaccionantes han de ser lo suficientemente abundantes, de manera que no exista limitación cuantitativa entre el soluto y el disolvente.

Se ha de alcanzar un equilibrio entre el agua y la fase mineral considerada a la temperatura interna en cuestión, que es la que se pretende averiguar.

Los cambios de composición química durante el ascenso a la superficie han de ser mínimos.

No ha de existir mezcla del agua termal ascendente con otras meteóricas de infiltración reciente.

En definitiva, el uso de un geotermómetro químico está controlado, en cuanto a fiabilidad de resultados, por tres supuestos:

Que el tiempo de residencia del agua (T_r) en el reservorio sea el necesario para que se establezcan los equilibrios necesarios.

Que el tiempo durante el ascenso del fluido termal (T_t) sea corto para que no haya transferencia térmica.

Que el tiempo necesario para que tenga lugar la reacción de equilibrio (T_c) sea elevado.

En general, debe cumplirse que $T_t < T_c < T_r$.

Los geotermómetros más utilizados (Cruz Sanjulián y Granda, 1979) en [35, 56] son los químicos. Una descripción detallada de los mismos se muestra a continuación:

– **Tipos de geotermómetros.**

Existen dos tipos de geotermómetros [35, 56]:

a) Cualitativos.

b) Cuantitativos.

En función del método en que se basan los geotermómetros pueden clasificarse en [50].:

a) Isotópicos.

b) Químicos.

Los dos grupos geotermométricos anteriores se pueden subdividir a su vez según se apliquen a los elementos o isótopos presentes en:

- Aguas termales.
- Vapores asociados.
- Determinados gases asociados.

A continuación se reseñan las principales características de los geotermómetros más usados internacionalmente y que son los aplicados en la presente tesis.

Geotermómetro SiO_2 .

La solubilidad de la sílice es sólo función de la temperatura para valores de pH comprendidos entre 2 y 9.3. Las aguas termales, surgen a la superficie, sobresaturadas en sílice respecto a la temperatura de salida y equilibradas con su temperatura original en el almacén. Es necesario determinar de qué fase mineral silíceo procede la sílice que se determina al efectuar el análisis del agua.

Las ecuaciones de solubilidad para las principales facies silíceas son:

Sílice amorfa:

$$t (^{\circ} \text{C}) = \frac{731}{4.52 - \log \text{SiO}_2} - 273.5$$

Calcedonia:

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{1032}{4.69 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$$

Cuarzo:

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{1309}{5.19 - \log \text{SiO}_2} - 273.15$$

Geotermómetro Na-K.

Se basa en el equilibrio catiónico del agua con los feldespatos integrantes de la roca (volcánicas y cristalinas). Es adecuado para sistemas de alta energía y fiable para temperaturas comprendidas entre 100 y 275 °C.

Las fórmulas de cálculo más utilizadas son las siguientes:

Fórmula de Ellis (1970).

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{855.6}{\log \frac{\text{Na}}{\text{K}} + 0.8573} - 273.15$$

Fórmula de Fournier y Truesdell (1973).

$$t (^{\circ} \text{C}) = \frac{777}{\log \frac{\text{Na}}{\text{K}} + 0.70} - 273.15$$

Geotermómetro Na-K-Ca.

Este método es válido hasta 340 °C. La fórmula (Fournier y Truesdell, 1973) es:

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{1647}{\log \frac{\text{Na}}{\text{K}} + b \log \frac{\text{Ca}}{\text{Na}} + 2.24} - 273.15$$

b = 4/3 para Ca/Na > 1 y t^a < 100 °C.

b = 1/3 para Ca/Na < 1 y t^a > 100 °C.

Geotermómetro Na-Li.

Las expresiones desarrolladas por Fouillac y Michard (1981) son:

Para aguas con salinidad baja.

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{1000}{\log \frac{\text{Na}}{\text{Li}} + 0.38} - 273.15$$

Para aguas salinas y salmueras.

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{1195}{\log \frac{\text{Na}}{\text{Li}} - 0.13} - 273.15$$

Su precisión es inferior a los otros métodos (+/- 20°C).

Geotermómetro Mg-Li (Kharaka y Mariner, 1989).

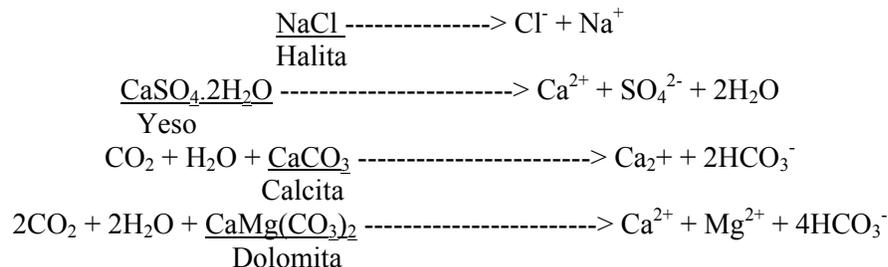
$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{2.200}{\log \frac{\text{Mg}00.5}{\text{Li}} + 5.47} - 273$$

♦ **Modelos Geoquímicos.**

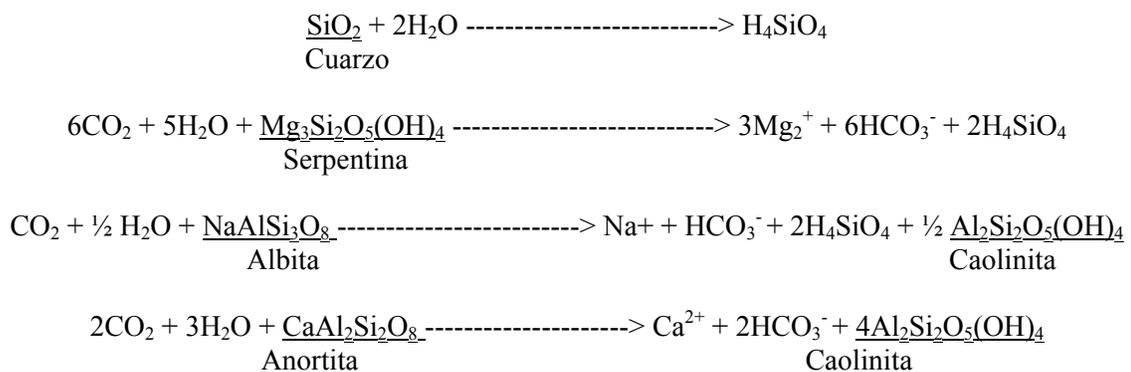
Las aguas naturales en su conjunto, en especial las minerales, adquieren su composición química, como ya ha sido explicado con anterioridad, mediante procesos geoquímicos de interacción agua-roca. Las aguas durante tales procesos tienden, en general, al equilibrio químico, lo cual no impide que en un determinado estadio, las mismas puedan encontrarse insaturadas, saturadas o sobresaturadas con respecto a un mineral o desplazadas hacia una u otra dirección del proceso. En la modelización geoquímica de las aguas de un acuífero determinado se parte de la caracterización de las aguas de acuerdo a la variación espacial y temporal de la composición química de las mismas, lo cual sirve de base para el establecimiento de una “estructura hidrogeoquímica”, que explique lo más fielmente posible la interrelación entre la litología atravesada por las aguas y su composición química [14].

Existe un conjunto de procesos geoquímicos (reacciones) que intervienen en el modo en que las aguas naturales adquieren su composición química, de ellos los principales son [23]:

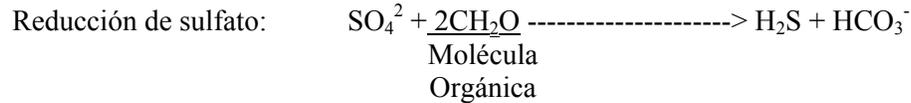
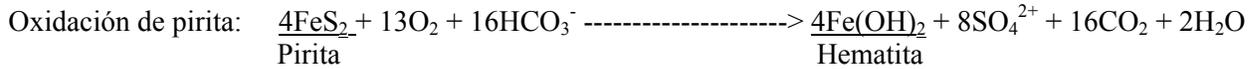
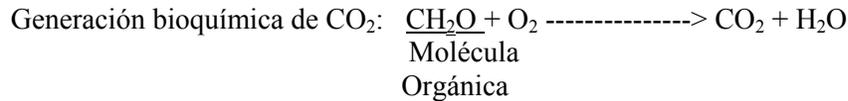
Disolución de minerales solubles.



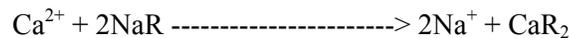
Intemperismo de sílice y silicatos.



Reacciones de oxidación-reducción.



Intercambio iónico.



Porcentaje de mezcla del componente 1 = $\frac{1}{1 + X} \times 100$

Porcentaje de mezcla del componente 2 = $\frac{X}{1 + X} \times 100$

La expresión anterior ha sido calculada (Fagundo et al, 2000) a partir de la expresión clásica de mezcla de aguas:

$$Q_m = \frac{C_1Q_1 + C_2Q_2}{(Q_1 + Q_2)}$$

donde: R: radical orgánico o inorgánico.

En el caso específico de las aguas minerales procedentes de sistemas hidrotermales, es necesario determinar también, como parte del modelo geoquímico, el aporte de fluidos gaseosos e hidrotermales a la composición química de las aguas, ello es importante ya que está comprobado que los aspectos geoquímicos de las aguas pueden variar según se trate de un sistema hidrotermal predominantemente acuoso o en fase vapor. En el primer caso la capacidad de disolución de minerales es grande y las aguas resultan altamente mineralizadas, mientras que en el segundo caso la capacidad de disolución de las aguas es menor y resultan ser poco mineralizadas. En todos los casos las emanaciones profundas pueden originar aguas con contenidos relativamente altos de Li, NH₄, Cl, B, I, B₂, H₂S, CO₂, SiO₂, As, Sb, Ba, Sn y Fe.

En los últimos años se han utilizados modelos hidrogeoquímicos para predecir el efecto de la mezcla del agua en diferentes condiciones hidrogeológicas sobre la composición química del agua resultante. También para determinar el grado de mezcla e identificar los procesos geoquímicos de interacción agua-roca que se producen en los acuíferos. Entre estos modelos se pueden citar: BALANCE (Parkhurst et al., 1982), PHREEQE (Parkhurst et al., 1980) y NET PATH (Plummer et al., 1991) en [22]. El procedimiento con tales modelos se describe a continuación:

- **Modelos de Mezcla.**

Para calcular la concentración de un agua (C_m) cuya composición se presupone sea debida a una mezcla de otros tipos de aguas (C_1 y C_2), se utiliza la siguiente expresión:

$$C_m = \frac{C_1 + C_2 X}{(1 + X)}$$

donde: X: factor de mezcla.

El porcentaje de mezcla se calcula según:

Q_m : caudal del agua de mezcla.

Q_1 y Q_2 : caudales de las fuentes 1 y 2, que aportan a la mezcla.

Mediante este simple procedimiento, es posible calcular un componente químico determinado, por ejemplo Ca^{2+} , Ma^{2+} , Cl^- , Mg , tomando diferentes valores de X, hasta obtener un estimado, del componente seleccionado del orden del componente real. En la presente Tesis se ha utilizado como factor de mezcla el valor medio de la sumatoria de los valores de X, para los casos en que el componente resultante de la mezcla, posea una concentración comprendida entre los valores extremos de los componentes de la mezcla. Para tales cálculos se ha utilizado el programa de computación MODELAGUA [24].

◆ **Modelos Geotérmicos.**

En las zonas de la corteza terrestre donde existe un gradiente anómalo de temperatura, se forman sistemas hidrotermales. Asociados a estas zonas existen acuíferos calentados o formación de aguas termales, donde el calor es transferido a través de flujos convectivos de agua fría descendente y flujos de conducción que liberan el calor hacia la atmósfera.

El establecimiento de un modelo geotérmico para un área dada, implica el estudio del ciclo mediante el cual las aguas de lluvia penetran dentro de la corteza terrestre, descendiendo mediante la acción de la fuerza de gravedad hasta un acuífero profundo y caliente y allí son recalentadas, provocando el posterior ascenso del fluido hidrotermal por las grietas o fracturas asociadas a sistemas de fallas. Tales fluidos en su ascenso pueden o no mezclarse con otras aguas, presentes en acuíferos menos profundos. En dicho estudio es imprescindible determinar o al menos, elaborar hipótesis con respecto a los siguientes parámetros: Profundidad máxima alcanzada por el agua y Temperatura del agua a dicha profundidad.

III. BREVE DESCRIPCIÓN FÍSICO-GEOGRÁFICA DE LAS REGIONES DONDE SE UBICAN LOS SECTORES EN ESTUDIO.

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico-Geográfica del territorio cubano, los sectores hidrominerales que se estudian, se encuentran ubicados en el Distrito Pinar del Río [15, 26], el cual comprende la provincia político-administrativa de Pinar del Río, así como una pequeña parte (porción más oriental) de la provincia La Habana, su extensión es de unos 13 835 km², aproximadamente.

Este distrito de forma general consta de un eje montañoso de estructura alpinotípica afectado por las orogénias Laramídica temprana del Cretácico superior, y Laramídica tardía del Eoceno inferior, rodeado por llanuras colinosas, onduladas hasta planas, lo que determinó su diferenciación en dos subdistritos físico geográficas y cinco regiones, que son:

◆ ***Subdistrito Llanuras de Pinar del Río, que comprende las regiones:***

1. Llanura de Guanahacabibes.
2. Llanura Norte de Pinar del Río.
3. Llanura Sur de Pinar del Río.

◆ ***Subdistrito Montañas de la cordillera de Guaniguanico, que comprende las regiones:***

1. Montañas de la Sierra de los Órganos.
2. Montañas de la Sierra del Rosario.

Los sectores hidrominerales en estudio se ubican dentro de las regiones que se detallan a continuación (ver figura 2):

◆ ***Región Llanura Norte de Pinar del Río.***

Constituye una estrecha franja litoral al norte del Distrito, cuyo ancho promedio es de 5 km. La misma ocupa un área aproximada de 1 683 Km², extendiéndose desde el municipio de Mantua hasta el municipio de Bahía Honda. Limita al norte y noreste con las Llanuras Sumergidas del Golfo de Guanahacabibes e Islas del Archipiélago de los Colorados; mientras que al sur y el sureste lo hace con las Montañas de las Sierras de los Órganos y del Rosario, al este limita con las Llanuras y Alturas del Norte de La Habana-Matanzas.

La constitución geológica del territorio es, hacia el litoral, de depósitos cuaternarios del Holoceno, donde se alternan limos, arcillas y arenas aluviales, con depósitos carbonatado-terrágenos y turbosos regiones bajas cenagosas. Hacia el este, casi a todo lo largo de la llanura, aparecen rocas del Jurásico Superior al Cretácico Inferior, compuestas por calcilitas, areniscas, calizas con silicitas, esquistos y tobas metamorizadas. En su extremo noreste afloran rocas del Cretácico Inferior-Superior (Albiano-Aptiano), donde abundan las areniscas, calizas silicitas, brechas, conglomerados, tufitas, tobas, lavas andesitas y basaltos. Hacia el este, aparecen sobrecorrimientos y nappes de rocas del Jurásico Inferior-Superior, compuestas por aleurolitas, argilitas, lutitas, areniscas, calizas, esquistos, cuarcitas, mármoles, metavulcanitas y rocas metaterrígenas.

El relieve de la región va desde llanuras acumulativas, formadas sobre rocas sedimentarias carbonatadas y carbonatado-terrágenas y sobre cortezas de intemperismo caoliníticas y cuarcíticas hasta llanuras denudativas formadas sobre rocas volcánicas, vulcanógeno-sedimentarias y metamórficas. Hipsométricamente el relieve varía desde muy plano y bajo, cercano a la costa hasta suavemente ondulado y colinoso hacia el límite con la Cordillera de Guaniguanico.

Los suelos en su mayor parte son ferralíticos cuarcíticos amarillos de textura arenosa, donde la vegetación original fundamentalmente de pinares ha sido modificada y actualmente esta ocupada por tabaco, cítricos, cultivos menores y caña de azúcar.

La densidad de la red fluvial tiene valores que fluctúan entre 1-1.5 Km/Km². Las principales corrientes fluviales, de oeste a este son: el río Mantua, el río Macurije y el río La Palma, que nacen en la Sierra de los Órganos y Mani Mani y otros cuyas fuentes se encuentran en la Sierra del Rosario.

En la Región, la temperatura media anual del aire fluctúa entre 24 °C y 26 °C, en general, hacia el sur, cercano a la cordillera de Guaniguanico, la media anual de temperatura es del orden de 22 °C a 24 °C; estos valores sufren pocos cambios con la estacionalidad. Los valores correspondientes a la lluvia media anual varían entre 800 mm/a, en la zona litoral a 1800 mm/a, en la zona premontañosa al sur.

Dentro de la Región predominan los paisajes de la clase Llanuras, específicamente del tipo Llanuras medianamente húmedas.

Al noroeste de la Región, cercano del poblado Arroyos de Mantua, encuentra el sector hidromineral Zequeira.

◆ *Región Llanura Sur de Pinar del Río.*

La misma se extiende de forma latitudinal, prácticamente por todo el segmento suroriental de la provincia. Limita al norte con las Montañas de la Sierra de los Órganos y la Sierra del Rosario, al suroeste se extiende hasta la Llanura de Guanahacabibes y al sur y sureste limita con las aguas del Golfo de Batabanó. Esta llanura tiene un área aproximada de 4950 Km², extendiéndose por los municipios Sandino, Guane, San Juan y

Martínez, San Luis, Pinar del río, Consolación del Sur, Los Palacios, San Cristóbal, Candelaria y el extremo occidental de Artemisa, en la provincia de la Habana.

La estructura geológica de la llanura se puede describir de la siguiente forma: hacia el este y en todo el litoral, en una estrecha faja, se encuentran depósitos cuaternarios holocénicos, con sedimentos carbonatados, terrígenos y turbosos, desarrollados principalmente, desde el norte de la bahía de Cortés, hasta la ensenada de Majana. Más hacia el oeste y el noroeste, en una gran extensión del territorio se desarrollan sedimentos del Pleistoceno, compuestos por fragmentos de margas, calizas, calcarenitas y depósitos terrígenos, por debajo de dichos sedimentos se encuentran calizas, margas, arcillas y conglomerados del Oligoceno Superior-Mioceno Superior (Formación Paso Real) y cercano al límite con la cordillera de Guaniguanico, en los terrenos más altos, la composición es de calizas y margas calcáreas de la Formación Loma Candela (Eoceno Medio).

El relieve de la Región presenta un escalonamiento desde su límite norte con la cordillera de Guaniguanico hasta la costa sur y está constituido fundamentalmente por una gran llanura acumulativa aluviomarina y aluvial, formada por depósitos arcillosos y arenosos, principalmente provenientes de los aportes de los ríos de la vertiente sur de la cordillera de Guaniguanico.

Los suelos más característicos son los arenosos cuarcíticos en el extremo oeste, los ferralíticos amarillos cuarcíticos hacia la zona central y en el extremo oriental ferralíticos laterizados e hidromórficos. La vegetación original era el bosque semideciduo y pinares, en la actualidad queda muy poco de estos tipos de vegetación y se dedica fundamentalmente a la actividad agrícola del tabaco, cítrico, frutales, cultivos menores, caña de azúcar y pastos.

La densidad de la red fluvial alcanza valores notables en el orden de los 2.0 a 2.5 Km/Km², en la porción suroeste de Guane y en el resto del territorio, valores de 0.5 a 1.5 Km/Km². La principal corriente fluvial es, el río Cuyaguaje y luego más al este los ríos Guamá, Ajiconal, Hondo, San Diego, Bacunagua, Los Palacios y San Juan.

La distribución de la temperatura media anual del aire es muy uniforme y oscila entre 24 °C a 26 °C. La variaciones estacionales de la temperatura se manifiestan con valores de 20 °C a 22 °C, en invierno y de 26 °C a 28 °C, en el verano. La lluvia media anual puede alcanzar valores entre 1 400 mm/a a 1 600 mm/a, en el sector norte de la llanura y valores entre 600 mm/a y 800 mm/a al sur.

Dentro de la Región predominan los paisajes de la clase Llanuras, específicamente del tipo Llanuras medianamente húmedas.

En la Región, en su parte centro-norte, se localiza el sector hidromineral Aguas Claras.

◆ *Región Montañas de la Sierra de los Órganos.*

Está ubicada en el sector centro occidental de la provincia, limita al norte con la Llanura norte de Pinar del Río, al sur y suroeste con la Llanura Sur de Pinar del Río y al este con las Montañas de la Sierra del Rosario. La región ocupa un área de 2 925 Km², aproximadamente y se extiende por las porciones meridionales de los municipios Mantua, Minas de Matahambre, Viñales y La Palma y las porciones septentrionales de los municipios Guane, San Juan y Martínez, Pinar del Río y Consolación del Sur.

Geológicamente la Región constituye un área muy complicada desde el punto de vista tectónico. Se caracteriza por un intenso escamamiento y los horizontes inferiores son ocupados por rocas de la Formación San Cayetano, las cuales constituyen un complejo terrígeno fuertemente deformado, constituido por areniscas cuarcíferas, limolitas, pizarras, cuarcitas y algunos paquetes de calizas. Toda esta gran unidad de miles de metros de espesor, se formó en condiciones parálico-marinas. Sobre este complejo terrígeno se depositaron grandes espesores de calizas de facies neríticas, las que pasan hacia arriba a calizas pelágicas, Formaciones Jagua, Guasasa y Artemisa. El complejo terrígeno es de edad Jurásico inferior-superior (Oxordiano) y el complejo carbonatado es de edad Jurásico superior (Oxordiano-Tithoniano) hasta el Paleoceno. Estas secuencias fueron desplazadas y sobrecorridas durante el Eoceno inferior-medio, con la consiguiente formación de olistostromas, fenómeno que se vincula con el sobrecorrimiento de los complejos del arco volcánico Cretácico y las ofiolitas. En toda la región, en el fondo de los valles y en las zonas llanas que rodean a las serranías, se encuentran sedimentos cuaternarios del Pleistoceno (Grupo ensenada Grande), arenas de cuarzo de la Formación Siguanea con intercalaciones de conglomerados y arcillas de la Formación Guane, del Pleistoceno Inferior.

El relieve de las alturas es vigoroso e irregular, del tipo horst y bloques en mantos de sobrecorrimiento, en especial en las alturas de mogotes. La altura media sobre el nivel del mar oscila entre 200 a 500 metros.

Los suelos más característicos son los esqueléticos, aluviales, ferralíticos rojos y ferríticos. La vegetación original es muy variada debido a la gran complejidad geológica y edáfica, encontrándose desde pinares con encino hasta el complejo de vegetación de mogotes.

Esta Región montañosa representa la cuenca superior de numerosos ríos y arroyos, que descargan directamente al mar o tributan en alguno de los numerosos ríos existentes. En la vertiente norte se destacan los ríos Buenavista, Brazo de San Juan, Veguilla, Nombre de Dios, Santa Lucía, Pan de azúcar, Rosario y La Jagua. En la vertiente sur se destacan los ríos Cuyaguaje y Guamá. Es frecuente que los ríos en la región, después de originarse en las alturas pizarrosas, desciendan a los valles para desaparecer, temporalmente, en sumideros al pie de las alturas de mogotes y comenzar a formar parte del gran volumen de aguas subterráneas que se manifiestan en la región, moviéndose por todo un vasto sistema de cavernas. La lámina del escurrimiento líquido de las serranías fluctúa entre 1 000 mm/a, en el centro de la región a 400 mm/a en las zonas más bajas.

La temperatura media anual del aire es de 24 °C, con isotermas aisladas de 23 °C. En invierno, en los valles intramontanos, al amanecer se han registrado temperaturas notablemente bajas. Las isoyetas aumentan desde 141 mm/a, en las áreas periféricas, hasta 1 800 mm/a en las cuencas superiores de los ríos Cuyaguaje, Guamá y Pan de Azúcar.

Dentro de la Región predominan los paisajes de la clase Colinas, Alturas y Montañas, específicamente de la subclase Depresiones intermontañas, colinas, alturas y montañas bajas húmedas.

Dentro del área en que se distribuye la Región, en su parte oeste y central, se ubican los sectores hidrominerales Los Portales y San Vicente, respectivamente.

◆ *Región Montañas de la Sierra del Rosario.*

Se ubica en el sector centro-oriental de la provincia, limitando al norte con la Llanura Norte de Pinar del Río, al sur con la Llanura Sur de Pinar del Río, al oeste por las Montañas de la Sierra de los Órganos y al este por la región de Llanuras y Alturas del Norte de la Habana-Matanzas. El territorio montañoso ocupa aproximadamente 1 125 km² de los municipios La Palma, Bahía Honda, Los Palacios, San Cristóbal y Candelaria y el sector occidental del municipio Artemisa, de la provincia de la Habana.

La geología de la Sierra del Rosario se caracteriza por una complejidad litológica y estructural, como consecuencia del desplazamiento y transporte tectónico de rocas ocurrido durante el Eoceno Medio. Los sedimentos carbonatados acuíferos de la Fm. Artemisa (Jurásico superior Cretácico inferior) se encuentran intercalados con sedimentos impermeables de tipo efusivo sedimentario, ultrabásico y esquistos arenosos pizarrosos de la Fm. San Cayetano (Jurásico Superior). Esta disposición estructural condiciona la formación de un relieve cársico (cokpitkarst), diferente a la de la Sierra de los órganos, donde es más típica la morfología de mogotes (karren karst). Desde el punto de vista hidrogeológico, en la Región, se pueden distinguir varios sistemas de acuíferos: a) Complejo acuífero de las rocas efusivo-sedimentarias (Cretácico); b) Complejo acuífero asociado a las rocas ultrabásicas (Mesozoico), c) Complejo acuífero asociado a materiales terrígeno-carbonatados del Paleógeno; d) Sistema acuífero desarrollado de las calizas del Cretácico; e) Zona de las aguas minerales y f) Complejos acuíferos asociados a las pizarras y esquistos arcillo arenosos (Jurásico-Cretácico).

El relieve, desde el punto de vista genético, puede clasificarse como de horts y bloques en mantos de sobrecorrimiento, con montañas bajas, fuertemente disecionadas, con valores de disección vertical que varían entre 300 y 500 metros.

Los suelos más característicos son los esqueléticos, aluviales, ferralíticos rojos y ferríticos. La vegetación original más representativa es de un bosque semidecídulo y siempreverde, actualmente sustituido por bosques naturales y secundarios, cultivos varios y pastos.

Las principales corrientes fluviales son los ríos: San Diego, Bacunagua, Mani Mani, Hondo y San Cristóbal, que corren por las pendientes norte y sur de la sierra, indistintamente, formando verdaderos cañones fluvio-cárcicos, con curso intermitente, pues en muchos tramos las aguas se sumergen bajo el cauce y continúa su trayecto a lo largo de galerías subterráneas, pudiendo o no resurgir en otro punto del cauce. La lámina de escurrimiento líquido es de las mayores del país.

Descripción Regional

La temperatura media anual del aire oscila entre 22 oC y 24 oC, pudiendo variar en invierno a valores entre 18 oC y 20 oC. La lluvia media anual es alta y puede variar desde valores de 2 800 mm/a, en la zona central a valores de 1 800 mm/a, en las zonas periféricas.

Dentro de la Región predominan los paisajes de la clase Colinas, Alturas y Montañas, específicamente de la subclase Depresiones intermontañosas, colinas, alturas y montañas bajas húmedas.

En la Región de oeste a este se localizan los sectores hidrogeológicos: Bermejales, San Diego de los Baños, Pozo Azul, Rancho Mar, El Sitio, Mil Cumbres, Cajálbana, Pan de Guajaibón, Rancho Lucas, Cacarajicara, Soroa y Las Terrazas.

Independientemente de lo planteado hasta el momento, en el Capítulo de Resultados y Discusión se describirán detalladamente las características físico-geográficas de los sectores en estudio.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

IV. 1 CARACTERIZACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES DE AGUAS MINERALES EN LOS SECTORES HIDROMINERALES ESTUDIADOS.

Para cada uno de los sectores hidrominerales estudiados (ver Inventario de los sectores en estudio, en Metodología de la Investigación) las diferentes fuentes de aguas minerales y pozos fueron caracterizados de acuerdo a los siguientes criterios:

- Localización.
- Características Físico Geográficas del entorno de desarrollo del sector hidrogeológico.
- Características Paisajísticas del entorno de desarrollo del sector hidrogeológico.
- Temperatura.
- Mineralización global.
- Mineralización predominante y específica.
- Origen.
- Uso actual y potencial.

Los resultados obtenidos demuestran la gran variabilidad de los parámetros analizados en la región de estudio. El análisis de los mencionados parámetros se realizará sector por sector.

IV.1.1. SECTOR HIDROMINERAL ZEQUEIRA.

El sector se localiza en el Municipio Mantua, 3 Km al este del poblado Arroyos de Mantua. Las coordenadas de su centro son: X: 155 200, Y: 284 600.

La estructura geológica del área es muy compleja y está enmarcada dentro de la Zona Estructuro-Formacional (ZEF) La Esperanza, en su parte más septentrional. El sector está enmarcado dentro de los depósitos de la Fm. Esperanza (J_3-K_1), representado por sedimentos terrígeno-carbonatados y carbonatado-terrígenos. Están presentes también, en el área sedimentos cuaternarios [15, 17, 26].

Hidrogeológicamente la manifestación se asocia con el complejo acuífero de la Fm. Esperanza, con un grado de acuosidad controlado por la tectónica y el consiguiente agrietamiento del macizo rocoso. La fuente más importante en el sector es la conocida con el nombre Azufre de Zequeira, cuyas aguas fueron muestreadas por primera vez por el Instituto de Hidrología y Climatología Médicas (Trelles, 1948) [55] y más recientemente, en el marco de los trabajos de prospección geológica realizados por la Empresa Geologica de Occidente. Actualmente la fuente muestra un caudal constante aproximado a 0.25 l/s y una temperatura de 24 °C [17].

El sector se ubica en un entorno antropizado, correspondiente con una llanura destinada fundamentalmente a

cultivos varios y tabaco, dentro de la cual se encuentran diversos asentamientos poblacionales. El sector no cuenta en sus proximidades con valores naturales, factibles de ser explotados desde el punto de vista del turismo. El centro turístico más cercano es Laguna Grande, el cual dista a 75 Km [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Llanura Norte de Pinar del Río y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Llanuras aluvio-marinas, formadas por depósitos arenosos y corteza de intemperismo caolinítica-ferralítica, con plantaciones de tabaco, pastos, sobre suelos Gley amarillento cuarcítico.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermas. Basados en la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las aguas se consideran Aguas Mediominales. Desde el punto de vista hidroquímico y basado en los criterios dados por Kurlov, las aguas clasifican como Aguas Sulfatadas-Bicarbonatadas Cálcicas y Cálcico-Magnésicas, todo lo cual se ilustra en la figura correspondiente al diagrama de Piper-Hill (Anexo III.1), teniendo en cuenta la mineralización especial de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas resultan sulfuradas. El análisis del propio diagrama de Piper-Hill, sobre el origen de las aguas, da como resultado que las mismas se agrupan en el campo de las aguas de origen mixto. De acuerdo a su uso actual y prospectivo (Korin, 1994) [35], las aguas clasifican como de uso balneológico y terapéutico.

En términos del uso de Patrones Hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 161-136, cuya expresión gráfica se representa en la figura representativa del diagrama de Stiff (Anexo III.1). Aplicando los Modelos de Balance de Masas se obtiene que los principales procesos geoquímicos, que explican la composición química de las aguas del sector son los siguientes: disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de plagioclasa (albita) y oxidación de pirita, con reducción parcial de sulfato. Estos procesos son coherentes con la presencia mayoritaria de los minerales calcita y dolomita en las calizas de la región (Furet et al, 1998) [23] y de materiales terrígenos de tipo esquistos arenosos (Peláez et al, 1990) [45]. La fuente de sulfatos puede atribuirse, tanto a los materiales carbonatados (Eimbel, 1947) [19] o a las formaciones polimetales, abundantes en esta región pinareña. Los procesos de reducción de sulfatos, lo cual origina presencia de H_2S , HS o azufre coloidal dependen del valor del pH y el ambiente reductor local, lo cual origina procesos biogeoquímicos.

IV.1.2 SECTOR HIDROMINERAL LOS PORTALES.

El sector se localiza en el municipio Guane, en el lugar conocido como Portales. Las coordenadas de su centro son: X: 187 420, Y: 272 000.

El sector se asocia a la ZEF Depósitos de la Cobertura Neógeno-Cuaternaria, y específicamente relacionado con las rocas carbonatadas de la Fm. Guasasa ($J_3^{ox} - K_2^1$), aunque la zona de alimentación del acuífero está ubicada, en la región de las Montañas de la Sierra de los Órganos [15, 17, 26].

Las aguas del sector están controladas por un sistema cársico, desarrollado en las calizas de la Fm. Guasasa.

En el yacimiento propiamente existen tres manantiales cársicos con un caudal de base aproximado a los 128 l/s, con gran estabilidad físico-química, en el tiempo [17].

El sector se encuentra en un territorio relativamente conservado, con valores naturales y estéticos [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra de Los Órganos y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de depresiones onduladas, formadas por esquistos, con pastos y plantaciones forestales, sobre suelos Ferralítico Rojo Lixiviado y Ferralítico Hidratado.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermales. Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las aguas se consideran Aguas Mediominales. Desde el punto de vista hidroquímico y basado en los criterios dados por Kurlov, las aguas clasifican como Aguas Bicarbonatadas Cálcicas, llegando en algunos casos a Aguas Bicarbonatadas-Sulfatadas Cálcicas, tal como se aprecia en el diagrama de Piper-Hill (Anexo III.2), teniendo en cuenta la mineralización especial de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas no resultan clasificadas por ningún criterio. El origen de dichas aguas, basado en el análisis del diagrama de Piper-Hill muestra que las mismas se agrupan en el campo de las aguas que proceden de fluidos meteóricos fríos o calientes. De acuerdo a su uso actual y prospectivo las aguas clasifican como Aguas de bebida (Korin, 1994) [35].

El patrón hidrogeoquímico principal para estas aguas es 181-172, cuya expresión gráfica, mediante el uso de diagramas de Stiff, se muestra en el Anexo III.2. Los principales procesos geoquímicos, que explican la composición química de estas aguas son: disolución congruentes de calcita y dolomita, oxidación de pirita e intercambio iónico de Ca^{2+} por Na^+ . Estos procesos son explicables por la presencia de los minerales calcita y dolomita en las calizas de la Formación Guasasa (Furet et al, 1988) [23]. Al igual que en el sector anterior, la fuente que aporta el sulfato al agua, es la pirita, mineral ampliamente establecido en los sedimentos de la Cordillera de Guaniguanico y no el yeso, el cual no se reporta en los estudios geológicos realizados. La reducción parcial del sulfato, originada por oxidación de la pirita, es provocada por la actividad de las bacterias sulforeductoras (Appelo y Postma, 1993) en [2].

IV.1.3 SECTOR HIDROMINERAL AGUAS CLARAS.

El sector se ubica en el municipio Pinar del Río a lo largo de la carretera Pinar del Río-Viñales entre el Campismo Internacional Aguas Claras y la Carretera a Ovas. Las coordenadas de su centro son: X: 223 550, Y: 296 200.

El sector está situado en los depósitos de la ZEF Complejo Metamórfico. La Fm. Capdevila ($P_1 - P_2^1$) es mapeada en la parte norte del área, constituida por secuencias flyschoides terrígenas donde predominan las areniscas polimícticas. Encima de la Fm. Capdevila yace discordantemente la Fm. Paso Real ($P_1 - P_2$) la que se mapea en forma de franja ancha en la porción sur y sureste del área. Seguramente el papel determinante en

el control y circulación de las aguas lo juegan las dislocaciones tectónicas perpendiculares a la falla Pinar [15, 17, 26].

Las aguas están asociadas a los depósitos de la Fm. Capdevila, que se caracterizan en el área por un bajo grado de acuosidad con gastos específicos de los pozos inferiores a 0.01 l/s/m [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Llanura Sur de Pinar del Río y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Llanuras acumulativo-denudativas medias, formada por cortezas de intemperismo caolinítica, con plantaciones de tabaco, sobre suelos Ferralíticos Cuarcítico Amarillo Lixiviados.

Teniendo en cuenta los criterios de la clasificación de Kurlov y la variabilidad en la composición química de las aguas, observada en el sector, fue posible separar los siguientes tipos de aguas :

- Aguas Bicarbonatadas Cálcidas
- Aguas Bicarbonatadas Sódicas, con mayor o menor contenido de calcio y magnesio
- Aguas Cloruradas Sódicas, con mayor o menor contenido de sulfato y magnesio
- Aguas Cloruradas Cálcidas, que pueden a veces presentar altos contenidos de bicarbonato y magnesio
- Aguas Sulfatadas Bicarbonatadas Cálcidas Sódicas
- Aguas Bicarbonatadas mixtas, con contenidos elevados, en ocasiones, de magnesio, calcio y sodio
- Aguas Sulfatadas Cloruradas o Cloruradas Sulfatadas mixtas

Lo anteriormente expresado está reflejado en los diagramas de Piper-Hill, correspondientes a las figuras agrupadas en los Anexos III.3.1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, respectivamente. Dichos diagramas muestran también los posibles orígenes de las aguas en el sector, Aguas procedentes de fluidos meteóricos fríos o calientes, Aguas procedentes de fluidos meteóricos enriquecidos en gases, Aguas de origen mixto y Aguas procedentes de fluidos geotermales primarios. Los patrones hidrogeoquímicos de estas aguas son muy variados, tal como se muestra en los diagramas de Stiff, correspondientes a los Anexos III.3.2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, correspondientes con los tipos de aguas arriba mencionados.

La mineralización de estas aguas es muy variada y oscila entre valores de 52 a valores de 6802 mg/l, lo cual las hace variar desde aguas oligominerales hasta minerales, pasando por el intervalo de aguas mediominales (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9]. De acuerdo a su uso actual y prospectivo las aguas del sector clasifican como de uso balneológico y terapéutico (Korim, 1994) [35].

Los procesos geoquímicos que explican la composición química de estas aguas son: disolución congruente de halita y serpentina, disolución incongruente de plagioclasa (albita y anortita) y oxidación de pirita, aunque dichas reacciones ocurren, para cada uno de los tipos de aguas señalados, en proporciones diferentes. En el caso del relativamente alto contenido de cloruro, que contrasta en muchos casos, con la baja mineralización de las aguas, pudiera estar relacionado con manifestaciones termales con predominio de la fase vapor, ricas en HCl gaseoso, lo cual es coherente con el carácter ácido reportado en muchas de las mediciones realizadas, $\text{pH} < 5$. Desafortunadamente, no existe información de la composición gaseosa de estas aguas (excepto CO_2),

por lo cual no se puede demostrar la hipótesis planteada. Los procesos geoquímicos antes señalados se justifican, por la presencia de plagioclasas y otros minerales del tipo aluminosilicatos, en los sedimentos no carbonatados de la región (Peláez et al, 1990) en [45].

IV.1.4 SECTOR HIDROMINERAL SAN VICENTE.

El sector se localiza en el municipio Viñales, exactamente en el centro turístico conocido con el nombre de Rancho San Vicente. Las coordenadas de su centro son: X: 221 000, Y: 317 400.

Geológicamente está ubicado dentro del área de desarrollo de la ZEF Los Órganos y está constituido fundamentalmente por capas de sedimentos terrígenos de la Fm. San Cayetano ($J_1 - J_3^{ox}$), así como por rocas carbonatadas de las Fm. Jagua (J_3^{ox}) y Guasasa ($J_3^{ox} - K_2^1$) [15, 17, 26].

Las aguas se asocian a las rocas carbonatadas (calizas) de la Fm. Guasasa y las mismas emergen a la superficie del terreno en forma de manantiales aprovechando zonas carsificadas de mayor permeabilidad. Los gastos de los manantiales son generalmente inferiores a 1 l/s siendo mayor la productividad de las captaciones por pozos [17].

Este sector es uno de los de mayores potencialidades dentro de la provincia para su explotación turística puesto que se localiza en el polo turístico de Viñales, donde existe una infraestructura hotelera y extrahotelera bien desarrollada, un entorno con altos valores estéticos. En el sector, actualmente existe una instalación hotelera, remozada recientemente y dotada de los locales necesarios para los tratamientos que allí se brindan [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra de Los Órganos y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Depresiones de Poljas marginales formadas por calizas y esquistos no carbonatados, con plantaciones de tabaco y cultivos menores.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermales. Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las aguas se consideran Aguas Minerales (Pozos 1 y 3) y Mediominales (Pozo 10). Desde el punto de vista hidroquímico y basado en los criterios dados por Kurlov, las aguas clasifican como Aguas Sulfatadas Cálcidas (Pozos 1 y 3) y como Aguas Bicarbonatadas-Sulfatadas Cálcidas y Aguas Bicarbonatadas-Sulfatadas Cálcidas-Sódicas (Pozo 10), todo lo cual se observa en el diagrama de Piper-Hill que se muestra en el Anexo III.4, el análisis del propio diagrama de Piper-Hill, sobre el origen de las aguas da como resultado que las mismas se agrupan en los campos de las aguas procedentes de fluidos meteóricos fríos o calientes y en el de las aguas de origen mixto. Teniendo en cuenta la mineralización especial de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas no resultan clasificadas de acuerdo a ningún componente. De acuerdo a su uso actual y prospectivo las aguas clasifican como de uso balneológico y terapéutico (Korin, 1994) [35].

Desde el punto de vista del estudio de los patrones hidrogeoquímicos, los principales tipos presentes en el

sector son 181-118 (Pozos 1 y 3) y 271-163 (Pozo 10), lo cual se corresponde con lo representado en la en Anexo III.4. Para estimar el origen hidroquímico de estas aguas, los cálculos de Balance de Masas se realizaron estimando primero, el aporte de la componente meteórica al pozo 10, representativo de un acuífero cársico de la zona saturada (restando el aporte debido a la extracción de masa por las lluvias y el proceso de evapotranspiración). Luego calculando la masa extraída del pozo 1, a partir de la composición del pozo 10 (ver los aspectos tratados en el capítulo II con relación al modelo de Balance de Masas).

Del análisis de los resultados del Balance de Masas en los pozos 1 y 10, se obtiene que los principales procesos geoquímicos, que explican la composición de estas aguas son:

- Pozo 1: Disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de plagioclasa (albita), oxidación de pirita y reducción parcial de sulfato.
- Pozo 10: Disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de albita y oxidación de pirita.

Estos procesos son coherentes con la composición mineralógica de las calizas de la Formación Guasasa (Furet et al, 1988) y la fuente del sulfato está relacionada con el mineral pirita. La presencia de H₂S, en las aguas del pozo 1, se debe a la reducción anaeróbica parcial del sulfato, en forma similar a como ocurre en la fuente Azufre de Zequeira.

IV.1.5 SECTOR HIDROMINERAL CUEVA DE LOS PORTALES.

El sector se localiza en el municipio La Palma, en el lugar conocido con el mismo nombre, en el límite entre la Sierra de los Órganos y la Sierra del Rosario. Las coordenadas de su centro son: X: 245 200, Y: 317 700.

El sector se localiza en la ZEF Los Órganos y en el mismo aflora una fuente de aguas minerales, que se encuentra ubicada en la cercanías de la Cueva de los Portales, cuyas aguas se originan por intemperismo de las calizas del miembro San Vicente, de la Fm. Guasasa (J₃^{ox} - K₂¹). En la región afloran también sedimentos del Paleógeno, constituidos por areniscas, esquistos y calizas de la Fm. Manacas (P₂^{lb-2a} mnc), así como sedimentos de la Fm. San Cayetano (J₁ - J₃^{ox}) [15, 17, 26].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra de Los Órganos y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Depresiones de Poljas marginales formadas por calizas y esquistos no carbonatados, con plantaciones de tabaco y cultivos menores. De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermiales. Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas se consideran Aguas Minerales. Desde el punto de vista hidroquímico y basado en los criterios dados por Kurlov, las aguas clasifican como Aguas Sulfatadas Cálceicas, criterio que se encuentra claramente reflejado en el diagrama de Piper-Hill que se muestra en el Anexo III.5. La caracterización del origen de las aguas, basado en el diagrama de Piper-Hill muestra como resultado que las

mismas se agrupan en el campo de las aguas de origen mixto. Teniendo en cuenta la mineralización especial de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas clasifican como sulfuradas. De acuerdo a su uso actual y prospectivo (Korin, 1994) [35], las aguas del sector clasifican como de uso balneológico y terapéutico.

Los métodos de reconocimiento de patrones hidrogeoquímicos muestran la siguiente relación para las aguas del sector: 361 - 167, lo cual está claramente expresado en los diagramas de Stiff que se muestran en el Anexo III.5.

La composición química de estas aguas, de acuerdo al modelo de Balance de Masas se explica mediante los siguientes procesos geoquímicos: disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de albita, oxidación de pirita y reducción de sulfato. La justificación de tales procesos coincide con la dada para el sector San Vicente.

IV.1.6 SECTOR HIDROMINERAL SAN DIEGO DE LOS BAÑOS.

El sector se localiza en el municipio Los Palacios en el mismo pueblo San Diego de los Baños, en las márgenes del río San Diego o, más propiamente Caiguanabo. Las coordenadas de su centro son X: 256 150, Y: 314 900.

Geológicamente está enmarcado en la ZEF Sierra del Rosario. Los depósitos en el área están representados por las secuencias terrígenas de la Fm. San Cayetano ($J_1 - J_3^{ox}$) y Francisco (J_3^{ox}), así como los depósitos carbonatados de la Fm. Artemisa de edad ($J_3^{th} - K_1$). En la porción sur del yacimiento se encuentran los depósitos de la Subzona San Diego de los Baños representados en este caso las secuencias flyschoides de las Fm. Capdevila [15, 17, 26].

Las aguas de este sector están asociadas a las calizas agrietadas y carsificadas de la Fm. Artemisa que afloran en el área del yacimiento y se vinculan más directamente al nudo de fallas conformado por la intersección de la falla Pinar con la falla San Diego de los Baños [17].

El desarrollo del asentamiento poblacional en esa zona se debe precisamente a la existencia de esas aguas, el entorno cuenta dentro del asentamiento con una infraestructura hotelera y extrahotelera para el servicio al turismo de salud y hacia el Norte y Oeste un relieve, vegetación y fauna con altos valores perceptuales [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra del Rosario y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Depresiones con fondo ondulado, formadas por esquistos, con pastos y plantaciones forestales, sobre suelos Ferralíticos rojos lixiviados y Ferralíticos rojos hidratado.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermas (Manantial El Tigre y Pozo 1) y Aguas Mesotermas (Manantiales El Templado y La Gallina). Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las aguas se consideran Aguas Mediominales (fuente El Templado) y Aguas Minerales (Manantiales El Tigre

y La Gallina y Pozo 1). El diagrama de Piper-Hill (Anexo III.6) muestra los principales tipos de aguas en el sector: Aguas Sulfatadas Cálcicas y Sulfatadas Cálcicas Sódicas, aunque esto último es más raro, de acuerdo a la mineralización especial de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994), las mismas clasifican como sulfuradas. Del análisis del diagrama de Piper-Hill, para llegar a conclusiones sobre el origen de las aguas, se puede concluir que las mismas se agrupan dentro del campo de las aguas de origen mixto. De acuerdo al uso actual y prospectivo de las aguas (Korin, 1994) [35], las mismas clasifican como de uso balneológico y terapéutico.

Los procesos geoquímicos que tienen lugar en este sector y que explican la composición química de las aguas, así como los Patrones Hidrogeoquímicos, de las aguas del sector, se estudiarán con mayor profundidad, en el acápite IV.2. de la presente Tesis.

IV.1.7 SECTOR HIDROMINERAL BERMEJALES.

El sector se localiza en el municipio Los Palacios, en el lugar conocido como Baños de Los Bermejales, en las márgenes del río San Diego. Las coordenadas de su centro son: X: 250 500, Y: 318 150.

El sector está enmarcado en la ZEF Sierra del Rosario. Dentro de ésta última, los depósitos están representados por las secuencias terrígenas de la Fm. San Cayetano ($J_1 - J_3^{ox}$) y Francisco (J_3^{ox}), así como los depósitos carbonatados de la Fm. Artemisa de edad ($J_3^{th} - K_1$) [15, 17, 26].

Las aguas están asociadas a las calizas agrietadas y carsificadas de la Fm. Artemisa y surgen a la superficie del terreno en forma de manantiales ascendentes, aprovechando para ello zonas tectónicas de mayor permeabilidad. El caudal sumario de las fuentes naturales, allí existentes es de 148 m³/día [17].

De acuerdo a su ubicación geográfica, el sector cuenta con un entorno con diversos valores naturales dada la cercanía a la Sierra de la Güira [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra del Rosario y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Depresiones onduladas formadas por esquistos, con pastos y plantaciones forestales, sobre suelos Ferralíticos rojos lixiviados y Ferralíticos rojos hidratado.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermiales. Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas se consideran Aguas Minerales. Desde el punto de vista hidroquímico y basado en los criterios dados por Kurlov, las aguas clasifican como Aguas Sulfatadas Cálcicas y Sulfatadas Cálcicas Sódicas, lo cual está reflejado en el diagrama de Piper-Hill, representado en el Anexo III.7, teniendo en cuenta la mineralización especial de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas clasifican como sulfuradas. La caracterización del origen de las aguas, basado en el diagrama de Piper-Hill muestra como resultado que las mismas se agrupan en el campo de las aguas con un origen mixto.

De acuerdo al uso actual y prospectivo de las aguas (Korin, 1994) [35], las mismas clasifican como de uso balneológico y terapéutico.

Los procesos geoquímicos que tienen lugar en este sector y que explican la composición química de las aguas, así como los Patrones Hidrogeoquímicos, de las aguas del sector, se estudiarán con mayor profundidad, al igual que en el caso del sector hidromineral San Diego de los Baños, en el acápite IV.2. de la presente Tesis.

IV.1.8 SECTOR HIDROMINERAL EL SITIO.

El sector está ubicado en el municipio La Palma, muy cerca del poblado El Sitio junto a la carretera que comunica este asentamiento poblacional con el área protegida Mil Cumbres. Las coordenadas de su centro son: X: 241 850, Y: 325 500.

Geológicamente está ubicado en la ZEF Sierra del Rosario, parte septentrional. En el área están propagados los depósitos de la Fm. Artemisa (J_3^{th} - K_1), compuesta por micritas de color gris oscuro agrietadas. Por encima de la Fm. Artemisa se describe la secuencia olistostrómica o de mezcla donde aparecen serpentinitas, gabros, zonas de brechas tectónicas, que conforman la Fm. Manacas ($P_2^{\text{bl-2a}}$ mnc), con un espesor que supera los 300 m [15, 17, 26].

Las aguas del sector están asociadas al complejo acuífero de los depósitos del Jurásico superior- Cretácico Inferior y específicamente a los sedimentos de la Fm. Artemisa por donde circulan dichas aguas. El grado de acuosidad del complejo acuífero está en dependencia de la intensidad del agrietamiento y tectonismo general del macizo rocoso. En el pozo P - 55 el complejo acuífero está confinado por la Fm. Manacas, las aguas minerales ascienden por el eje del pozo desde una profundidad de 340m y brotan con un caudal aproximado a los 2 l/s [17].

Su entorno se caracteriza por presentar cultivos menores y pastizales [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra del Rosario y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Depresiones con fondo ondulado, formadas por esquistos, con pastos y plantaciones forestales, sobre suelos Ferralíticos rojos lixiviados y Ferralíticos rojos hidratado.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermales. Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las aguas se consideran Aguas Mediominales. El diagrama de Piper-Hill (Anexo III.8) muestra los principales tipos de aguas en el sector: Aguas Bicarbonatadas Mixtas (con casi iguales contenidos de Ca y Mg y un poco más elevados de Na), teniendo en cuenta la mineralización especial de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas clasifican como sulfuradas. El origen de estas aguas, de acuerdo al análisis del diagrama de Piper-Hill, puede plantearse relacionado con fluidos meteóricos enriquecidos en gases. De acuerdo al uso actual y prospectivo de las aguas (Korin, 1994) [35], las

mismas clasifican como de uso balneológico y terapéutico.

En términos del uso de Patrones Hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 181 - 532, cuya expresión gráfica se representa, en el Anexo III.8, mediante diagramas de Stiff. El origen de la composición química de estas aguas fue determinado, aplicando el Balance de Masas por procesos geoquímicos de disolución de serpentina en la zona no saturada del acuífero, deducidos a partir de la sustracción de la concentración de las aguas del sector Cajálbana y el agua de lluvia; procesos de disolución incongruente de plagioclasas (anortita y albita), acompañados de procesos de oxidación de piritita y reducción parcial de sulfato. Tales procesos se justifican por la presencia de minerales de tipo básico y ultrabásico en los sedimentos que forman parte de la cobertura confinante del acuífero. Los minerales de tipo aluminosilicatos, son más solubles a temperaturas altas (propias de los drenajes profundos) y a bajos valores de pH (Appelo y Postma, 1993) en [2].

IV.1.9 SECTOR HIDROMINERAL MIL CUMBRES.

El sector se localiza en el municipio La Palma en el lugar conocido como Mil Cumbres. Las coordenadas de su centro son: X: 254 700, Y: 326 850.

Se encuentra dentro del Área Protegida Mil Cumbres en una zona de alturas de pizarras donde predominan los pastizales y algunas plantaciones forestales [17].

El sector está enmarcado en la parte más septentrional de la ZEF Sierra del Rosario. En el área de la manifestación afloran depósitos de la Fm. Artemisa (J_3^{th} - K_1) compuestos por calizas de color gris oscuro con intercalaciones de lutitas y areniscas. Por encima de la Fm. Artemisa aparecen secuencias olistostrómicas de la Fm. Manacas ($P_2^{\text{bl-2a}}$ mnc), compuesta por bloques de diversa composición, gabros, basaltos, serpentinitas, diabasas, bloques de calizas, etc. El sector está intensamente afectado por el tectonismo [15, 17, 26].

El sector se asocia al complejo acuífero en los depósitos del Jurásico Superior y Cretácico Inferior, en este caso específico a la Fm. Artemisa representada por calizas grises. Predominan aquí las aguas de fisuras, grietas y fallas. El grado de acuosidad es muy irregular y depende del grado de tectonismo del corte geológico. En el centro del sector se localiza un manantial ascendente con un caudal aproximado de 1 l/seg cual es muy posible que ascienda por algunas estructura tectónicas mezclándose con aguas menos profundas en la parte superior del corte geológico [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra del Rosario y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Valles estrechos de depresiones estructuro-fluviales, formados por aluvios de esquistos y rocas ígneas básicas y medias.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermales. Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las aguas se consideran Aguas Mediominerales. El diagrama de Piper-Hill (Anexo III.9) muestra los principales tipos de aguas en el sector: Aguas Bicarbonatadas Cálcicas (fuentes Mil Cumbres, Kikere,

Recogedor, Batea, Cuatro Caminos y Juan Carmona) o Cálcidas Sódicas (fuente No sulfuroso, más raro) y Aguas Bicarbonatadas Sódicas (fuentes Majagua y Sulfuroso), teniendo en cuenta los criterios de la mineralización especial de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas clasifican como sulfuradas. El origen de estas aguas, de acuerdo al análisis del diagrama de Piper-Hill, puede plantearse relacionado con fluidos meteóricos fríos o calientes y con fluidos meteóricos enriquecidos en gases. De acuerdo al uso actual y prospectivo de las aguas (Korin, 1994) [35], las mismas clasifican como de uso balneológico y terapéutico.

En términos del uso de Patrones Hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 181 - 181 (aguas bicarbonatadas cálcicas) y 181 - 532 (aguas bicarbonatadas sódicas cálcicas), cuya expresión gráfica se representa, en el Anexo III.9, mediante diagramas de Stiff. El origen de la composición química de las aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas que ocurren en el sector, representadas por las fuentes Mil Cumbres y No Sulfuroso, según los cálculos del Balance de Masas (considerando una matriz predominantemente carbonatada, en el acuífero que drena la Formación Artemisa), puede explicarse, principalmente, mediante los siguientes procesos geoquímicos: disolución congruente de calcita y dolomita, disolución incongruente de albita y oxidación de pirita. En el caso de la fuente Sulfuroso, representativo de un agua procedente del drenaje profundo, asociado a los materiales no carbonatados de la Fm. Manacas, la composición química de las aguas puede explicarse, por la ocurrencia fundamentalmente de procesos geoquímicos de disolución congruente de halita y serpentina, disolución incongruente de plagioclasas (albita y anortita), oxidación de pirita y reducción de sulfato.

IV.1.10 SECTOR HIDROMINERAL CAJÁLBANA.

El sector se localiza en el municipio La Palma, en la parte suroeste de la Región Cajálbana, territorio compuesto por alturas en forma de altiplanicie. Las coordenadas de su centro son: X: 248 000, Y: 333 000. El sector forma parte del complejo ofiolítico, que se extiende por la parte septentrional de la Sierra del Rosario, dentro de la ZEF Bahía Honda. Está formado por rocas ultrabásicas, constituidas fundamentalmente por serpentinitas, harzburgitas, con gran contenido de lateritas ferroniquelíferas, de edad Mesozoico [15, 17, 26].

La aguas del sector están asociadas al complejo acuífero del Mesozoico[17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra del Rosario y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Colinas y alturas de serpentinita, en forma de altiplanicie, con Bosques de Pinos y matorrales espinosos, sobre suelos Ferríticos y Fersialíticos.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermales. Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las aguas se consideran Aguas Mediominales. El diagrama de Piper-Hill (Anexo III.10) muestra

los principales tipos de aguas en el sector: Aguas Bicarbonatadas Magnésicas y más raramente Magnésicas Sódicas, teniendo en cuenta la mineralización especial de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas no clasifican respecto a ningún componente. El origen de estas aguas, de acuerdo al análisis del diagrama de Piper-Hill, puede plantearse relacionado con fluidos meteóricos fríos o calientes. De acuerdo al uso actual y prospectivo de las aguas (Korin, 1994) [9], las mismas clasifican como de uso balneológico y terapéutico.

En términos del uso de Patrones Hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 118-181, cuya expresión gráfica se representa, en el Anexo III.10, mediante diagramas de Stiff. La composición química de estas aguas, según los cálculos del Balance de Masas, está determinada, principalmente, por el intemperismo de la serpentina, mineral principal de la serpentinita y otras rocas ultrabásicas, que constituyen el macizo Cajálbana. La fuente del sulfato, al igual que en los anteriores sectores, puede atribuirse a la oxidación de la pirita, aunque en el caso de las aguas superficiales, puede existir una contribución de tipo antropogénica.

IV.1.11 SECTOR HIDROMINERAL PAN DE GUAJAIBÓN.

El sector se localiza en el municipio Bahía Honda, en la parte sureste de la estructura conocida con el nombre de Pan de Guajaibón, en la porción noroccidental de la Sierra del Rosario. Las coordenadas de su centro son: X: 260 000, Y: 329 000.

El sector está ubicado dentro de la ZEF Bahía Honda y está formado por potentes espesores de rocas calizas masivas neríticas, calizas fragmentarias, dolomias, calizas dolomitizadas, calizas con lentes de pedernal y brechas calcáreas, de la Fm. Guajaibón ($J_1 - K_2^{al-cc}$), dichas rocas se distinguen por la presencia de bauxitas [15, 17, 26].

La aguas del sector están asociadas tanto al complejo acuífero del Cretácico Inferior-Superior. En el sector existe un gran número de surgencias y manantiales cársicos [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra del Rosario y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Alturas de roca sedimentaria carbonatada, en forma de cúpulas y cadenas, con Bosques semidecídulos mesófilos y vegetación de mogotes, sobre suelos Ferralíticos rojos y Pardo con carbonatos.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermales. Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las aguas se consideran Aguas Mediominales. El diagrama de Piper-Hill (Anexo III.11) muestra los principales tipos de aguas en el sector: Aguas Bicarbonatadas Cálcicas (fuentes Ancón, La Curra, A. del Caimito, Caimito, Mameyes, C. De la Bija, A. de Mameyes y C. de Sagua) y Bicarbonatadas Sulfatadas Cálcicas (fuentes Fernando), teniendo en cuenta la mineralización especial de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas no clasifican con respecto a ninguno de los componentes.

El origen de estas aguas, de acuerdo al análisis del diagrama de Piper-Hill, puede plantearse relacionado con fluidos meteóricos fríos o calientes. De acuerdo al uso actual y prospectivo de las aguas (Korin, 1994) [35], las mismas clasifican como aguas de bebida.

En términos del uso de Patrones Hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 181 - 181, cuya expresión gráfica se representa, en el Anexo III.11, mediante diagramas de Stiff. El origen de la composición química de las aguas de este sector, puede ser explicado a partir de la fuente Ancón, por donde surgen las aguas del drenaje del macizo carbonatado Pan de Guajaibón. Los procesos geoquímicos que explican esta composición son: disolución de calcita y dolomita, así como oxidación de pirita. La presencia de calcita y dolomita en los sedimentos de la Formación Guajaibón, ha sido reportada por Furet et al, 1988 en [23].

IV.1.12 SECTOR HIDROMINERAL RANCHO LUCAS.

El sector se localiza en el municipio Bahía Honda, en las márgenes de río Las Pozas, al este del poblado Rancho Lucas. Las coordenadas de su centro son: X: 268 000, Y: 332 000.

En el sector se encuentra ubicado en la ZEF Bahía Honda y está constituido por calizas estratificadas y argilitas calcáreas de la Fm. Lucas (K_1^{b-bm}) [15, 17, 26].

Las aguas del sector están asociadas tanto al complejo acuífero del Cretácico Inferior. En el sector existen varios manantiales cársicos [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra del Rosario y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Alturas de roca sedimentaria carbonatada, en forma de cúpulas y cadenas, con Bosques semidecídulo mesófilo y vegetación de mogotes, sobre suelos Ferralíticos rojos y Pardo con carbonatos.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermales. Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las aguas se consideran Aguas Mediominales. El diagrama de Piper-Hill (Anexo III.12) muestra los principales tipos de aguas en el sector: Aguas Bicarbonatadas Cálcicas (fuente Lucas 2) y Bicarbonatadas Cálcicas Sódicas (fuentes Lucas 1 y Fuente), teniendo en cuenta la mineralización especial de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas no clasifican con respecto a ningún componente. El origen de estas aguas, de acuerdo al análisis del diagrama de Piper-Hill, puede plantearse relacionado con fluidos meteóricos fríos o calientes. De acuerdo al uso actual y prospectivo de las aguas (Korin, 1994) [35], las mismas clasifican como aguas de bebida.

En términos del uso de Patrones Hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 181 - 181, cuya expresión gráfica se representa, en el Anexo III.12, mediante diagramas de Stiff. La composición química de estas fuentes, refleja la litología que drena (calizas estratificadas y argilitas de la Fm. Lucas) y la misma se explica mediante procesos de disolución congruente de halita, calcita y dolomita,

disolución incongruente de plagioclasas (albita) y oxidación de pirita. La pérdida aparente de halita, pudiera deberse a que el contenido real de Cl⁻ del agua de lluvia, tomado por el contenido de la región de Guajaibón, es menor en el sector analizado. Estos procesos son similares a los que tienen lugar en el sector Pan de Guajaibón, de composición litológica similar.

IV.1.13 SECTOR HIDROMINERAL CACARAJÍCARA.

El sector se localiza en el municipio Bahía Honda, en las márgenes de río Las Pozas, al este del sector Rancho Lucas. Las coordenadas del centro son: X: 268 000, Y: 335 000.

El sector está ubicado en la ZEF Bahía Honda y se encuentra asociado a las rocas brechas, calcarenitas y calcilitas de la Fm. Cacarajícara (K₂^m). Las rocas del macizo se encuentran muy fracturadas por procesos tectónicos [15, 17, 26].

Las aguas del sector están asociadas al drenaje profundo del carso, las mismas emergen a la superficie a través de varios manantiales [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra del Rosario y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Llanuras estructuro erosivas, medianamente colinosas, de areniscas y lutitas, con Pastos y matorral secundario, sobre suelos Pardos con y sin carbonatos.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermales. Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las aguas se consideran Aguas Mediominales. El diagrama de Piper-Hill (Anexo III.13) muestra los principales tipos de aguas en el sector: Aguas Bicarbonatadas Cálcidas (fuente Cacarajícara 2) y Bicarbonatadas Sulfatadas Cálcidas Sódicas (fuentes Sulfuroso y No sulfuroso), teniendo en cuenta la mineralización especial de las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas no clasifican de acuerdo a ninguno de los componentes. El origen de estas aguas, de acuerdo al análisis del diagrama de Piper-Hill, puede plantearse relacionado con fluidos meteóricos fríos o calientes y fluidos meteóricos enriquecidos en gases. De acuerdo al uso actual y prospectivo de las aguas (Korin, 1994) [35], las mismas clasifican como aguas de uso balneológico y terapéutico.

En términos del uso de Patrones Hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde a los patrones de tipo 181 - 181 (aguas bicarbonatadas cálcicas) y 451 - 163 (aguas bicarbonatadas sulfatadas cálcicas sódicas), cuya expresión gráfica se representa, en el Anexo III.13, mediante diagramas de Stiff. La composición química de las aguas de este sector, representativas de la zona de saturación del drenaje cársico, puede explicarse mediante los siguientes procesos químicos: disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de plagioclasa (albita), así como oxidación de pirita, con reducción parcial de sulfato. El rasgo diferenciante lo ofrece el manantial Cacarajícara Sulfuroso. Para explicar esta composición es necesario tomar en cuenta, además de los procesos anteriormente mencionados, el proceso de

reducción de sulfato. Aunque tales procesos son totalmente lógicos y se corresponden con los reportados en otros sectores, donde las calizas son predominantes, no existe información sobre la composición mineralógica de estas rocas.

IV.1.14 SECTOR HIDROMINERAL POZO AZUL.

El sector se ubica en el municipio San Cristóbal en las márgenes del río San Cristóbal en el lugar conocido con el mismo nombre (Pozo Azul). Se encuentra muy próximo a la presa La Paila específicamente en el valle del río San Cristóbal dentro del macizo montañoso. Las coordenadas de su centro son: X: 287 700, Y: 328 250.

En la actualidad no tiene acceso, los asentamientos poblacionales más próximos son la comunidad rural Modesto Serrano y el núcleo urbano San Cristóbal [17].

Desde el punto de vista geológico el sector Pozo Azul se ubica en los depósitos de la parte meridional de la ZEF Sierra del Rosario. El corte estratigráfico en el área está representado por los depósitos carbonatados de la Fm. Artemisa ($J_3^{\text{th}} - K_1$) y Polier ($K_1^{\text{v-al}}$) con un predominio de la primera. El corte calcáreo está compuesto por micritas carbonosas con intercalaciones de lutitas y pedernales. En el sector se observa un desarrollo intenso de las estructuras tectónicas disyuntivas y plicativas asociadas a movimientos de sobrecorrimientos [15, 17, 26].

Las aguas se asocian al complejo acuífero de la Fm. Artemisa, caracterizado por la presencia de aguas de fisura, grietas y en zonas tectónicas. En el sector se han mapeado 3 manantiales ascendentes con un caudal total aproximado a los 2 l/s [17].

Por su ubicación cuenta con un entorno con valores naturales (flora y fauna relevantes), así como también una calidad visual alta [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra del Rosario y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Alturas de roca sedimentaria carbonatada, en forma de tabula, con Matorrales secundarios y Bosques semidecídúo mesófilo, sobre suelos Ferralíticos rojos y Pardos con carbonatos.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermales. Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las aguas se consideran Aguas Mediominales. El diagrama de Piper-Hill (Anexo III.14) muestra los principales tipos de aguas en el sector: Aguas Bicarbonatadas Cálcidas, teniendo en cuenta la mineralización especial presente en las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas no clasifican de acuerdo a ninguno de los componentes. El origen de estas aguas, de acuerdo al análisis del diagrama de Piper-Hill, puede plantearse relacionado con fluidos meteóricos fríos o calientes. De acuerdo al uso actual y prospectivo de las aguas (Korin, 1994) [35], las mismas clasifican como aguas de uso balneológico y terapéutico.

En términos del uso de Patrones Hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 163 - 181, cuya expresión gráfica se representa, en el Anexo III.14, mediante diagramas de Stiff. La composición química de estas aguas se explica, principalmente por los procesos de disolución congruente de calcita y dolomita, disolución incongruente de plagioclasa (albita), así como procesos de oxidación de piritita y reducción parcial de sulfato. Los contenidos de Cl^- de estas aguas disminuyen con respecto a los contenidos correspondientes con los procesos relacionados con el agua de lluvia y por procesos de evapotranspiración. Ello pudiera deberse a una pérdida de halita, en el camino de reacción del agua subterránea, o al hecho de que el contenido de Cl^- del agua de lluvia es inferior al valor tomado en cuenta, valor medio de la región del Pan de Guajaibón, sector que se encuentra más próximo al mar que el sector Pozo Azul; en este caso no fue posible usar otro valor, por falta de información referida al contenido medio del agua de lluvia en la parte septentrional de la Sierra del Rosario. Las calizas de la formación Artemisa son similares a las de la Formación Guasasa en su composición mineralógica (Furet et al, 1988) [23]. Las mismas están constituidas, fundamentalmente, por calcita y dolomita y tienen cantidades relativamente más pequeñas de otros minerales, tales como plagioclasas y compuestos orgánicos. Estas propiedades justifican la ocurrencia de los procesos geoquímicos anteriormente expuestos.

IV.1.15 SECTOR HIDROMINERAL RANCHO MAR.

El sector está ubicado en el municipio San Cristóbal en el lugar con el mismo nombre (Rancho Mar). Este yacimiento se encuentra en el centro de la Sierra del Rosario, en las cercanías del cruce entre la carretera de montaña y la carretera Norte-Sur que vincula a San Cristóbal con Bahía Honda. Son las coordenadas de su centro: X: 282 860, Y: 333 570.

La estructura geológica del sector se identifica con las estructuras regionales de la ZEF Sierra del Rosario donde se aprecia un escamamiento tectónico formado por planos de sobrecorrimientos. En el área están ampliamente propagados los sedimentos de las Fm. Artemisa ($J_3^{th} - K_1$) y Polier de edad (K_1^{v-al}), constituidos por calizas y micritas de color gris con intercalaciones de areniscas y argilitas. Están presentes también en el sector rocas vulcanógenas sedimentarias de la Fm. Sábalo (J_3), representadas por diabasas, basaltos y cuerpos de gabros intercalados con rocas sedimentarias [15, 17, 26].

Las características hidrogeológicas del sector son complejas y están dadas por la interrelación existente entre los diferentes tipos de sedimentos y formaciones geológicas en el mecanismo de génesis y circulación de las aguas minerales [17].

El entorno de este sector es atractivo topográficamente y presenta algunos valores florísticos y faunísticos, aunque estos componentes presentan cierto grado de degradación por las actividades forestales, ganaderas y cafetaleras que se realizan en la zona [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra del Rosario y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las

unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Valles estrechos de depresiones estructuro fluviales, formados por aluvios de esquistos y rocas ígneas básicas y medias.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermales. Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las aguas se consideran Aguas Minerales. El diagrama de Piper-Hill (Anexo III.15) muestra los principales tipos de aguas en el sector: Aguas Bicarbonatadas Sódicas, teniendo en cuenta la mineralización especial, presente en las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas clasifican como sulfuradas. El origen de estas aguas, de acuerdo al análisis del diagrama de Piper-Hill, puede plantearse relacionado con fluidos meteóricos enriquecidos en gases. De acuerdo al uso actual y prospectivo de las aguas (Korin, 1994) [35], las mismas clasifican como aguas de uso balneológico y terapéutico.

En términos del uso de Patrones Hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 811 - 271, cuya expresión gráfica se representa, en el Anexo III.15, mediante diagramas de Stiff. Para determinar el origen de la composición química de estas aguas, fue necesario tomar en consideración que las aguas en este sector son del tipo bicarbonatadas sódicas y que los sedimentos a los cuales están asociadas las mismas están constituidos, fundamentalmente por sílice, plagioclasas (albita, anortita, etc.), serpentina y otros aluminosilicatos, en forma similar a los esquistos y areniscas de la Formación San Cayetano (Peláez, 1990) en [45]. Sobre esta base la composición química de las aguas de la fuente Rancho Mar, puede explicarse, fundamentalmente, a partir de los siguientes procesos geoquímicos: disolución congruente de halita y serpentina, disolución incongruente de plagioclasa (albita y anortita), oxidación de piritita y reducción parcial de sulfato.

IV.1.16 SECTOR HIDROMINERAL SOROA.

El sector se localiza en el municipio Candelaria, dentro de la Villa Turística Soroa. Este yacimiento está enclavado en el valle del río Manantiales. Las coordenadas de su centro son: X: 293 850, Y: 330 800.

En el sector afloran exclusivamente depósitos pertenecientes a las secuencias septentrionales de la ZEF Sierra del Rosario, donde están ampliamente propagados los depósitos de la Fm. Sábalo (J_3), representada por un corte vulcanógeno sedimentario compuesto por basaltos y diabasas con intercalaciones de calizas, lutitas y areniscas. Concordante con estos depósitos en el área aflora el corte carbonatado-terrágeno de las Fm. Artemisa ($J_3^{\text{th}} - K_1$) y Polier ($K_1^{\text{v-al}}$) [15, 17, 26].

Las aguas del sector están asociadas tanto al complejo acuífero de las calizas grises de la Fm. Artemisa como a las rocas ultrabásicas de la Fm. Sábalo. Según datos preliminares observados en los pozos PH 1 y P 12 perforados en este sector, el grado de acuosidad es bajo con gastos específicos en dichos pozos del orden de 0.011/s/m. En el área se manifiestan 3 manantiales ascendentes con un gasto total aproximado a los 3 l/s constante durante todo el año según observaciones aisladas [17].

Su entorno cuenta con altos valores naturales, así como una infraestructura de alojamiento y extrahotelera

bien desarrollada [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra del Rosario y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Alturas de rocas sedimentarias carbonatadas, con Matorrales secundarios y Bosques semidecídulo mesófilo, sobre suelos Ferralíticos rojos y Pardos con carbonatos.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [15], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermales. Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las aguas se consideran Aguas Oligominerales. El diagrama de Piper-Hill (Anexo III.16) muestra los principales tipos de aguas en el sector: Aguas Bicarbonatadas Cálcidas y Bicarbonatadas Cálcidas Magnésicas (más raro), teniendo en cuenta la mineralización especial presente en las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas clasifican como sulfuradas. El origen de estas aguas, de acuerdo al análisis del diagrama de Piper-Hill, puede plantearse relacionado con fluidos meteóricos fríos o calientes. De acuerdo al uso actual y prospectivo de las aguas (Korin, 1994) [35], las mismas clasifican como aguas de uso balneológico y terapéutico.

En términos del uso de Patrones Hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 163 - 271, cuya expresión gráfica se representa, en el Anexo III.16, mediante diagramas de Stiff. La citada composición química de las aguas, es explicada mediante los siguientes procesos: disolución congruente de halita, calcita y dolomita, disolución incongruente de plagioclasa (albita), así como oxidación de pirita con reducción parcial de sulfatos.

IV.1.17 SECTOR HIDROMINERAL LAS TERRAZAS.

El sector se localiza en el municipio La Palma, en las márgenes del río San Juan, dentro del área de desarrollo del centro turístico Las Terrazas, en la parte noreste de la Sierra del Rosario. Las coordenadas de su centro son: X: 301 000, Y: 337 000.

El sector está ubicado en la ZEF Sierra del Rosario y se encuentra asociado a las calizas de la Fm. Artemisa (J_3^{th} - K_1), rocas ultrabásicas serpentinizadas de la asociación ofiolítica, areniscas de la Fm. Manacas, de edad Paleógeno y rocas terrígenas de la Fm. San Cayetano (J_1 - J_3^{ox}) [15, 17, 26].

Las aguas del sector son representativas de la zona de saturación de los macizos carbonatados y emergen en el contacto con fallas paralelas y transversales a la Falla Pinar [17].

Desde el punto de vista de la Regionalización Físico Geográfica del territorio cubano [15], el sector se ubica en la Región Montañas de la Sierra del Rosario y teniendo en cuenta los criterios de la Clasificación de las unidades de los Paisajes del territorio cubano [15], el sector clasifica como de Alturas de rocas sedimentarias carbonatada y terrígeno-carbonatada (margas y calizas), onduladas y cupulares, con pastos y matorrales medios y bosques siempreverde micrófilo, sobre suelos Húmicos Carbonáticos, Pardo con carbonatos y sin carbonatos.

De acuerdo a su temperatura (Castany, 1971) [35], las aguas del sector clasifican como Aguas Hipotermales. Teniendo en cuenta la mineralización global o cuantitativa (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las aguas se consideran Aguas Mediominales. El diagrama de Piper-Hill (Anexo III.17) muestra los principales tipos de aguas en el sector: Aguas Bicarbonatadas Cálcicas, teniendo en cuenta la mineralización especial, presente en las aguas (Armijo Valenzuela M. y San Martín Bacaicoa J., 1994) [9], las mismas clasifican como sulfuradas. El origen de estas aguas, de acuerdo al análisis del diagrama de Piper-Hill, puede plantearse relacionado con fluidos meteóricos fríos o calientes. De acuerdo al uso actual y perspectiva de las aguas (Korin, 1994) [35], las mismas clasifican como aguas de uso balneológico y terapéutico.

En términos del uso de Patrones Hidroquímicos, la composición química de las aguas corresponde al patrón de tipo 181 - 181, cuya expresión gráfica se representa, en el Anexo III.17, mediante diagramas de Stiff. Los cálculos del Balance de Masas, que explican la composición química de las aguas de la fuente Pastora ofrecen la información de que los procesos vinculados al origen de la composición química de sus aguas son: disolución congruente de halita, calcita y dolomita, oxidación de piritita y reducción de sulfato. Estos procesos son coherentes con la composición mineralógica de los sedimentos de la Formación Artemisa.

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos de la clasificación de las fuentes de aguas minerales de los sectores estudiados, del texto de la tabla fueron excluidos los datos correspondientes al sector Aguas Claras, por considerar, los autores del presente trabajo, que los datos del sector no han sido lo suficientemente investigados. Del análisis de la tabla se pueden extraer las siguientes consideraciones:

1. De acuerdo al criterio de la temperatura de las aguas (Castany, 1971), 53 fuentes clasifican como hipotermales y sólo dos fuentes como mesotermales; no existen fuentes clasificadas como frías o hipertermales.
2. De acuerdo al criterio de la mineralización global de las aguas (Armijo V. y San Martín B., 1994), 1 fuente clasifica como oligomineral, 40 fuentes como mediominales y 14 como minerales.
3. De acuerdo al criterio de la mineralización especial presente en las aguas y, apartir de los datos con que se contaba, 32 fuentes clasificaron como sulfuradas y 23 no clasificaron.
4. De acuerdo a los criterios hidroquímicos y basados en la clasificación de Kurlov, 29 fuentes clasificaron como bicarbonatadas cálcicas, 13 fuentes clasificaron como sulfatadas cálcicas, 3 fuentes clasificaron como bicarbonatadas sódicas, 2 fuentes clasificaron como bicarbonatadas sulfatadas cálcicas, 1 fuente clasifica como bicarbonatada cálcica magnésica, 5 fuentes clasificaron como bicarbonatadas cálcicas sódicas, 2 fuentes clasificaron como bicarbonatadas magnésicas, 2 fuentes clasificaron como bicarbonatadas magnésicas sódicas, 10 fuentes clasificaron como sulfatadas cálcicas sódicas y 3 fuentes clasificaron como bicarbonatadas sulfatadas mixtas y bicarbonatadas mixtas. En este punto es necesario recordar que existen sectores en que se manifiestan más de un tipo de aguas.
5. De acuerdo a los criterios del uso actual y potencial de las aguas (Korin, 1994), 37 fuentes clasificaron como de uso balneológico y terapéutico, 5 con de uso balneológico y 13 como aguas de bebida.

6. De acuerdo a los criterios de origen (Piper-Hill, 1944), 36 fuentes clasificaron como relacionadas con fluidos meteóricos fríos o calientes, 6 fuentes clasificaron como relacionadas con fluidos meteóricos enriquecidos en gases y 14 fuentes clasificaron como relacionadas con fluidos de origen mixto.

Sobre el análisis de la distribución de los sectores hidrominerales en las diferentes unidades de paisaje, dentro del Distrito Físico-Geográfico Pinar del Río (figura 3), se pueden hacer las siguientes observaciones:

1. La mayoría de los sectores se concentran en la zona de mayor complejidad paisajística, lo cual coincide con la Región Físico-Geográfica Montañas de la Sierra del Rosario.
2. La mayoría de los sectores se encuentran cercanos o en la frontera entre dos unidades de paisaje, lo cual es coincidente con los criterios geólogo-estructurales utilizados en la subdivisión de las unidades paisajísticas.
3. Los sectores se distribuyen dentro de unidades correspondientes a las Llanuras (1.) y a las Colinas, Alturas y Montañas (2.).
4. Dentro de la unidad Llanuras, los sectores se concentran en la unidad Llanuras medianamente húmedas (1.2.) y dentro de la unidad Colinas, Alturas y Montañas, los sectores se concentran en la unidad Depresiones intermontañosas, colinas, alturas y montañas bajas húmedas (2.2.).
5. Dentro de la unidad de Llanuras medianamente húmedas, se observan sectores distribuidos en las siguientes unidades:
 - Sector Aguas Claras: el cual se encuentra ubicado dentro de la unidad Llanuras acumulativas, formadas por rocas sedimentarias carbonatadas y terrígeno-carbonatadas y cortezas de intemperismo caoliníticas y cuarcíticas y depósitos arenosos, con plantaciones de tabaco, cítricos y pastos, y restos de bosques de pinos, sobre suelos Ferralítico cuarcítico Amarillo Lixiviados, Ferralítico Amarillo Rojizo Lixiviados y Arenoso Cuarcíticos (1.2.3.).
 - Sector Cacarajícara: el cual se encuentra ubicado dentro de la unidad Llanuras denudativas, formadas por rocas volcánicas, vulcanógeno-sedimentarias y metamórficas, con pastos y matorrales, sobre suelos Pardos con Carbonatos y sin Carbonatos y Ferralíticos Rojo Parduzcos Ferromagnesiales (1.2.4).
 - Sector Zequeira: el cual se encuentra ubicado dentro de la unidad Llanuras acumulativas aluvio-marinas, formadas por depósitos arcillosos y arenosos, con pastos, arrozales y restos de bosques semidecíduos, sobre suelos Oscuro Plásticos, Gley Ferralíticos y Gley Húmicos (1.2.5.).
6. Dentro de la unidad de Depresiones intermontañosas, colinas, alturas y montañas bajas húmedas, se observan sectores distribuidos en las siguientes unidades:
 - Sectores San Vicente y Cueva de los Portales: se encuentran ubicados dentro de la unidad Llanuras de depresiones estructuro-denudativas y cárcicas, formadas por rocas sedimentarias, carbonatadas, terrígeno-carbonatadas y metamórficas, con plantaciones de cultivos y bosques siempreverdes, sobre suelos Aluviales, Pardos con Carbonatos, Ferralíticos Rojos y Ferralíticos Cuarcíferos amarillos Lixiviados (2.2.1.).

- Sectores Los Portales, San Diego de los Baños, Bermejales, El Sitio, Mil Cumbres, Rancho Mar: se encuentran ubicados dentro de la unidad Llanuras de depresiones estructuro-fluviales y erosivas, formadas por depósitos aluviales de rocas vulcanógeno-sedimentarias y metamórficas, con matorrales secundarios y bosques de galería, sobre suelos Aluviales, Pardos con Carbonatos y sin Carbonatos (2.2.2.).
- Sectores Pan de Guajaibón, Rancho Lucas, Pozo azul, Soroa y Las Terrazas: se encuentran ubicados dentro de la unidad Colinas y Alturas denudativo-cárcicas, formadas por rocas sedimentarias, terrígeno carbonatadas y carbonatadas, con pastos, bosques semidecíduos y vegetación de mogotes, sobre suelos Húmicos Carbonáticos, Pardo con Carbonatos, Ferralíticos Rojos y afloramientos de rocas (2.2.3.).
- Sector Cajálbana: se encuentra dentro de la unidad Colinas y Alturas denudativas, formadas por rocas metamórficas, vulcanógeno-sedimentarias y volcánicas, con pastos, matorrales secundarios y bosques de pinos, sobre suelos Ferralíticos, Ferríticos, Ferralíticos y Pardos (2.2.4.).

IV.2 CARACTERIZACIÓN DE LAS FUENTES DE AGUAS MINERALES DEL SISTEMA HIDROTHERMAL SAN DIEGO DE LOS BAÑOS - BERMEJALES.

En este acápite de la Tesis se realiza un estudio, con un mayor grado de precisión, sobre las propiedades de las aguas minerales del sistema hidrotermal San Diego de los Baños - Bermejales. La selección de esta área, dentro del distrito Pinar del Río, se debe a la gran cantidad de datos hidroquímicos disponibles y al hecho de que en los sectores San Diego de los Baños y Bermejales se encuentran representados la mayor parte de los tipos de aguas que ocurren en la región occidental de Cuba, los cuales son:

Aguas bicarbonatadas cálcicas, de mediana mineralización, características de las fuentes y pozos que drenan calizas y emiten desde las zonas no saturadas y saturadas de los acuíferos carbonatados.

Aguas bicarbonatadas sódicas, características de la zona saturada y del drenaje profundo de los acuíferos desarrollados en esquistos y areniscas.

Aguas sulfatadas cálcicas, procedentes del drenaje profundo de los macizos carbonatados y que brotan al exterior a través de las grietas asociadas a las fallas, o por perforaciones hechas en estos sitios.

Aguas mixtas (bicarbonatadas-sulfatadas, sulfatadas-bicarbonatadas cálcicas, cálcicas sódicas, etc.), que resultan de la mezcla de aguas procedentes de acuíferos profundos y someros, desarrollados en diferentes litologías.

Al estudio se adicionaron un conjunto de datos [35], los cuales complementan la información con que se viene trabajando.

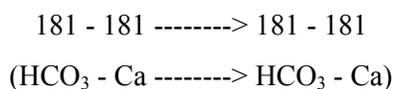
A continuación se describen los resultados obtenidos en el estudio.

IV.2.1 APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE RECONOCIMIENTO DE PATRONES HIDROGEOQUÍMICOS.

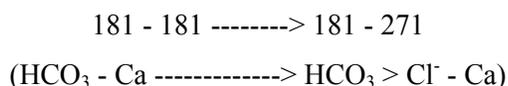
En la tabla 3 se presentan los resultados del procesamiento de 117 datos hidroquímicos, correspondientes al muestreo realizado por Peláez et al. (1990) en [45]. Se obtienen por esta vía un total de 27 patrones y 13 tipos

hidroquímicos de aguas. De su análisis se puede inferir que dichos patrones pudieran originarse a partir de los siguientes caminos de reacción:

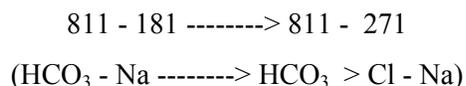
1. Disolución de calizas (reacción favorecida a bajas temperaturas) con la participación de una cierta cantidad de CO₂ de carácter biogénico o hidrotermal. En este caso no se produce cambio de patrón hidrogeoquímico, la composición del agua cambia cualitativamente y no cuantitativamente:



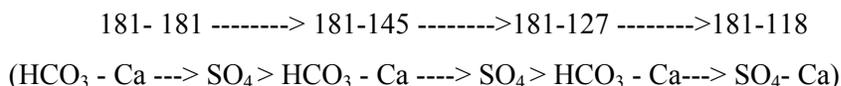
En el caso en que se produzca una reconcentración del Cl⁻ por evapotranspiración o efecto termal, la evolución pudiera ser del tipo:



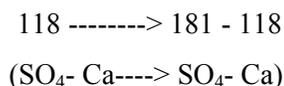
2. Disolución de aluminosilicatos (reacción favorecida por las altas temperaturas) y reconcentración de Cl⁻ por los mecanismos anteriores:



3. Oxidación de piritas en un agua bicarbonatada cálcica.



4. Reducción de sulfato generando agua con mayor o menor contenido de H₂S. Por lo general se produce sin cambio de patrón.

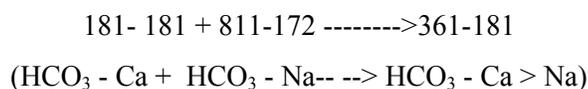


Las reacciones químicas que explican los procesos de disolución o precipitación de minerales, así como de oxidación de piritas y reducción parcial de sulfato se muestran en la tabla 4.

El origen de otras facies hidroquímicas puede ser explicado mediante procesos de mezclas de aguas:

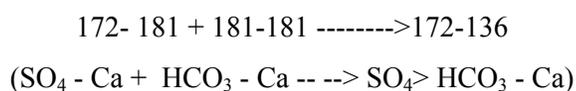
5. Formación de aguas HCO₃ - Ca > Na

Los patrones 361-181 y 361-127, típicos de aguas bicarbonatadas cálcicas sódicas pueden ser originadas por mezclas de aguas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas:



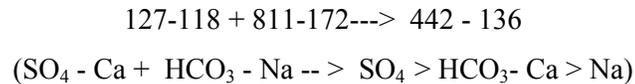
1. Formación de aguas SO₄ > HCO₃ - Ca

Los patrones 172 - 136, 172 - 127 y 172 - 136, característicos de aguas sulfatadas bicarbonatadas sódicas, pueden originarse a partir de una mezcla de aguas sulfatadas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas:



2. Formación de aguas $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 - \text{Ca} > \text{Na}$

Los patrones 442-136, 442-127, 268 - 127 y 271-118, propios de las aguas sulfatadas bicarbonatadas cálcicas sódicas pueden originarse a partir de la mezcla de aguas sulfatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas:

**IV.2.2 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE BALANCE DE MASAS.**

Con el objetivo de estudiar la aplicación de los métodos de balance de masas para interpretar los principales procesos geoquímicos que controlan la composición química de las aguas estudiadas en el sistema hidrotermal San Diego de los Baños - Bermejales se seleccionaron diferentes muestras, representativas de los dos miembros extremos del proceso inicial (A) y final (B). Los procesos geoquímicos más importantes que tienen lugar en el sistema hidrotermal estudiado, pueden representarse mediante las reacciones químicas que se presentan en la tabla 4. Los Anexos III.6 y III.7 muestran los diagramas de Stiff, obtenidos para los principales tipos de aguas estudiados en el sistema hidrotermal San Diego de los Baños – Bermejales.

♦ *Procesos de disolución-precipitación de minerales y de oxidación-reducción*

Comenzaremos por determinar los procesos geoquímicos relacionados con la meteorización de las rocas fundamentales de la zona de alimentación del acuífero, esto es, las calizas de la Fm. Artemisa, para lo cual estudiaremos la cantidad de componentes que extraen las lluvias que caen en la región y percolan a través de estas rocas. Con el objetivo de ilustrar estos procesos, se tomaron muestras de lluvia y de la fuente Mil Cúmbres, ubicado a 15 km al norte del sistema hidrotermal, el cual drena en condiciones subsuperficiales los sedimentos de la Fm. Artemisa (Fagundo, 1996) en [22].

En la tabla 5 se muestra, mediante balance de masas, que la composición química de esta fuente puede explicarse a partir de procesos de intemperismo por parte de las lluvias locales. En este análisis se utilizan las diferencias iónicas (Δ ion) entre los dos miembros extremos que se consideran, comenzando con el proceso de disolución de dolomita, ya que constituye la única fuente de Mg^{2+} disponible, luego se sigue con el proceso de disolución de calcita (descontando la cantidad de ΔCa^{2+} utilizada en el proceso anterior). La disolución de halita constituye el siguiente paso. El resto del ΔNa^+ que queda puede atribuirse al proceso de disolución de los silicatos sódicos (albita) y potásicos (feldespato K), este último en menor proporción. Finalmente el $\square \text{SO}_4^{2-}$ puede atribuirse a la oxidación de pirritas. El proceso geoquímico neto implica disolución de calcita, dolomita y albita; disolución de NaCl (reconcentrado en las capas más superficiales por evapotranspiración o procesos hidrotermales) y oxidación de pirita. En este último caso se requiere un aporte adicional de CO_2 del orden de 100 mg/l, cantidad ésta que el agua de lluvia puede extraer de la materia orgánica disponible en el suelo y de las capas de los sedimentos rocosos.

El segundo ejemplo corresponde a un proceso de disolución de calizas, (calcita y dolomita), acompañado de otras reacciones químicas. Estos procesos están bien representados en aquellos acuíferos desarrollados en las calizas de la Fm. Artemisa que no tienen contacto con las fisuras y grietas de la falla San Diego de los Baños. Para ilustrar los mismos, se tomaron dos muestras de la fuente Mil Cumbres.

En la tabla 6 se presentan los resultados del balance de masas y de la interpretación de los procesos geoquímicos que tienen lugar en ese sitio. Nótese que las diferencias entre los Δ iónicos obtenidas por balance de masa a partir de las variaciones propuestas y las obtenidas por la diferencia entre los miembros extremos de la reacción son nulos o muy bajos, con excepción del CO_2 , que requiere de un suministro extra al igual que en el caso anterior.

A continuación se discute un proceso de evolución química en aguas bicarbonatadas sódicas donde intervienen además del proceso de disolución de aluminosilicatos, otros procesos geoquímicos. Estos procesos son comunes en las aguas que drenan los materiales acuíferos de la Fm. San Cayetano y puede ilustrarse mediante las muestras tomadas en el pozo 3 a 40 m (A) y el pozo 4A (103- 206 m), tal como se ilustra en la tabla 7. En este caso se obtiene un buen balance de masas, asumiendo la combinación de procesos de disolución de los minerales calcita, dolomita, albita y halita combinadas con precipitación de cuarzo, oxidación de piritas y reducción parcial de sulfatos.

El siguiente ejemplo refleja la ocurrencia de un proceso geoquímico complejo, donde intervienen reacciones de disolución y precipitación de minerales, así como de oxidación de piritas y reducción de sulfatos. La evolución de las aguas del pozo 1, interpretadas a partir de muestras tomadas entre 0 y 84 m y entre 84 y 122, m constituye un ejemplo interesante cuyo comportamiento puede explicarse a través de la ocurrencia de un conjunto de procesos combinados, tal como se aprecia en la tabla 8. En este caso; el balance es bueno para la mayoría de los componentes, con excepción de HCO_3^- y CO_2 donde los desbalances son de 0.26 y 5.10 mmol/l respectivamente. El exceso de CO_2 respecto al real puede estar relacionado con un posible aporte de tipo hidrotermal.

Los procesos que explican este tipo de evolución química implican disolución de los minerales calcita, dolomita, halita y cuarzo, conjuntamente con precipitación de albita, oxidación de piritas y reducción parcial de sulfato, necesitándose para el completo balance un aporte adicional de CO_2 (5.10 mmol/l) como en casos anteriores.

◆ *Procesos de mezcla de aguas*

En el análisis de reconocimiento de patrones hidrogeoquímicos realizados anteriormente se presentaron varios posibles procesos de mezclas de aguas, las cuales eran capaces de originar otras aguas de diferentes naturaleza hidroquímica. En este acápite se aplicarán las técnicas de balance para fundamentar esos procesos. En estos casos las aguas pueden mezclarse en diferentes proporciones, de modo que se puede expresar en forma general:



Donde la concentración teórica de C_t será:

$$C_t = \frac{n A + m B}{n + m}$$

Esta expresión es similar a la presentada en el acápite 3.7.1. del Capítulo II, haciendo a $n = 1$ y a $m = x$.

La validación de la hipótesis de mezcla, se realiza comparando el componente C_t obtenido mediante el cálculo numérico y la concentración del componente de referencia que se supone sea originado (C).

El primer ejemplo corresponde a la mezcla de aguas del tipo bicarbonatadas cálcica con aguas bicarbonatadas sódicas, las cuales originan otra del tipo bicarbonatada cálcica sódica. Como miembros extremos de la mezcla pueden tomarse el pozo 3 (90 m) y el pozo 3 (40 m), y como resultado de la mezcla el pozo 13 (tabla 9). En la tabla se demuestra que, sobre la base de una proporción de mezcla de 1.2 a 1 (54.5 y 45.5 % respectivamente), se obtiene un agua con una composición química muy parecida a la tomada de referencia. Las diferencias encontradas pueden deberse al carácter no lineal de estos procesos, los cuales dan lugar a la ocurrencia simultánea de otros.

El segundo ejemplo de mezclas de aguas que se presenta, trata de explicar la formación de aguas del tipo sulfatadas bicarbonatadas sódicas cálcicas (pozo 4 entre 115- 195 m) a partir de la mezcla de aguas de del tipo sulfatada cálcica (pozo 4 a 100 m) y del tipo bicarbonatada sódicas (pozo 4 entre 103 - 206 m). Las aguas que se mezclan corresponden a horizontes acuíferos desarrollados en la Fm. Artemisa (que al parecer interactúan con aguas procedentes del drenaje profundo a través de las fallas) y la Fm. San Cayetano. El agua resultante fue tomada en un horizonte acuífero subyacente. Durante los trabajos de campos realizados por Peláez et al. (1990) en [45], se detectaron estas mezclas como resultado de la conexión hidráulica de esos horizontes durante la perforación y explotación (tabla 10). En la tabla se presentan los resultados del cálculo del balance de masas correspondiente a esta mezcla en proporciones de 1:1, notándose que existe muy buena similitud entre los datos calculados y los reales

El tercer ejemplo de mezclas de aguas trata de explicar la formación de las facies hidroquímicas sulfatadas bicarbonatadas cálcicas (pozo1; 0-122 m) a partir de las facies bicarbonatadas cálcicas (pozo2; 90 m) y sulfatadas cálcicas (pozo 1; 237-320 m). El origen de este tipo de mezcla pudiera atribuirse a el contacto de aguas procedentes del drenaje profundo, las cuales ascienden a través de la falla, con aguas más someras originales por intemperismo de las calizas de la Fm. Artemisa (tabla 11). En la tabla se presentan los resultados de los cálculos numéricos sobre la base de una proporción de mezcla de 1.5 a 1 (60 % y 40 % respectivamente). Como puede observarse, las diferencias entre los datos reales y los calculados no son muy grandes y los mismo pueden deberse, como en los casos anteriores, al carácter no lineal de la mezcla que da lugar a la ocurrencia simultánea de otros procesos geoquímicos.

Con excepción del $Na^+ + K^+$, los restantes componentes químicos ajustan bastante bien al balance de masas. Este exceso de masas respecto a la muestra real pudiera explicarse asumiendo un proceso simultáneo de precipitación de cuarzo.

♦ *Proceso de adquisición de la composición química de las aguas.*

La composición química de las fuentes de San Diego de los Baños y Bermejales varía entre sulfatadas bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas. La composición química de estos principales tipos de aguas puede ser explicada mediante el método de balance de masas, a partir de procesos geoquímicos que involucran, principalmente mezclas de aguas en diferentes proporciones de los tipos $\text{SO}_4\text{-Ca}$ y $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ (aguas procedentes del drenaje profundo con las aguas de los horizontes acuíferos de la Fm. Artemisa). En la tabla 12 se presenta el resultado del balance de masas correspondiente a una mezcla de las aguas del pozo 1 (237-320 m), con aguas del pozo 2 (90 m) en proporciones de 1.8 a 1.

Esta mezcla puede explicar la composición del agua de la fuente La Gallina (muestreada el 15-10-87), siendo necesario para lograr un mayor balance, la ocurrencia adicional de un proceso geoquímico que involucra disolución de calcita y dolomita, precipitación de albita así como una reducción parcial de sulfato. Todos estos procesos son lógicos teniendo en cuenta que en la mezcla se producen variaciones de la temperatura y las presiones de CO_2 y H_2S , y que en la zona más la superficie, pudieran ocurrir procesos biogeoquímicos de reducción anaeróbica de sulfatos (Drever, 1982; Bitton, 1994) en [23].

La composición química de la fuente El Templado puede ser explicada también por la mezcla de las aguas anteriores, pero con diferente proporción. Mediante cálculos numéricos a base de tanteo se arriba a que a partir de una proporción de 1.8 (64.3 %) partes del agua del pozo 2 (90 m) y 1 parte (35,7 %) de las aguas del pozo 1 (237-320), es posible explicar la composición de dicho fuente (tabla 13).

Para alcanzar la composición química real, además de la mezcla de estas aguas, se requiere considerar un proceso simultáneo de precipitación de calcita, disolución de dolomita y reducción de sulfato.

La composición química de la fuente M1 (Bermejales), del tipo sulfatada cálcica sódica puede explicarse mediante una mezcla de aguas de tipo bicarbonatada sódica y sulfatada cálcica. Teniendo en cuenta la alta mineralización de las aguas de la fuente M1, se seleccionó como miembro extremo del agua $\text{SO}_4\text{-Ca}$, la del pozo 1 (237-320 m) y como agua bicarbonatada sódica la del Pozo 4A (103-206 m). Se logran buenos resultados mediante una proporción de mezcla de 2.7 a 1, esto es, 77 % y 27 % respectivamente (tabla 14).

En forma similar, se pueden buscar proporciones adecuados que expliquen la composición química de los fuentes de Bermejales (M2-M5), tomando como muestras extremos en este caso, las del pozo 4 (cuya composición es similar a la del pozo 1, $\text{SO}_4\text{-Ca}$) y la del agua del tipo $\text{HCO}_3\text{-Ca}$, que pueden ser las del mismo pozo 2 o la del pozo 3, (más cercano) en el intervalo de 90 a 290 m de profundidad (Tab. 15).

Estas aguas son del tipo sulfatadas cálcicas y a su composición se puede arribar mediante una proporción de mezcla de 0.3 (30 %) y 0.7 (70 %) de las aguas de los pozos 3 (90 m) y 4 (103-206 m) aproximadamente. Las diferencias iónicas pueden deberse a otros procesos geoquímicos que se producen conjuntamente con la mezcla.

IV.2.3 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTADÍSTICA MULTIVARIADA.

En los acápite anteriores fueron estudiados los procesos de interacción agua-roca y de mezcla de aguas que tienen lugar en el sistema hidrotermal de San Diego de los Baños, por diferentes métodos: reconocimiento de patrones hidrogeoquímicos, balance de masas y análisis de mezcla. Queda ahora estudiar dichos procesos bajo la óptica de los análisis matemáticos multivariados, principalmente, análisis de cluster y análisis factorial.

Del total de muestras correspondientes al trabajo de exploración detallada llevado a cabo en el sistema hidrotermal San Diego de los Baños – Bermejales [45] y el muestreo realizado en la fuente Mil Cubres (N = 19) por Fagundo et. al. (1993) en [22], fueron seleccionados 22 datos representativos de los tipos de aguas presentes en esos sectores. Con los mismos fue creada una matriz constituida por 22 individuos y 14 variables (Temperatura, pH, TSS, CaCO₃, CO₂, H₂S, H₂SiO₃, HCO₃⁻, CO₃²⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺+K⁺). La misma fue procesada mediante el sistema Statistica [53].

En la figura 4 se presentan los resultados de la clasificación mediante análisis de cluster, realizada utilizándose el método de unión simple y como medida de similitud, la distancia euclidiana. Se aprecian dos grupos y un “outlier” (individuo aislado). El primer grupo numérico está formado por las variables Temperatura, SO₄²⁻, Ca²⁺ y H₂SiO₃, lo cual indica el aporte del ambiente de las aguas minerales del tipo sulfatadas cálcicas. El segundo grupo está asociado a las variables pH, HCO₃⁻, CO₃²⁻, Cl⁻, TSS, Mg²⁺, CO₂ y Na⁺+K⁺, lo cual es indicativo de la influencia tanto del acuífero cársico somero desarrollado en la Fm. Artemisa (aguas bicarbonatadas cálcicas), como del medio no cársico representado por las areniscas y esquistos de la Fm. San Cayetano (aguas bicarbonatadas – cloruradas sódicas). El outlier es el H₂S, el cual al parecer está relacionado con las aguas del drenaje profundo, asociadas tanto a los materiales de la Fm. Artemisa como de la Fm. San Cayetano.

En el dendrograma correspondiente a la clasificación de los datos (Fig. 5), se observan tres grupos separados entre sí a un nivel de similitud muy bajo, en los cuales se encuentran agrupadas las aguas de las fuentes El Tigre, El Templado y La Gallina (aguas sulfatadas bicarbonatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas); las fuentes de Bermejales junto dos muestras del pozo 1, una del pozo 4 y otra del pozo 12 (aguas sulfatadas cálcicas y sulfatadas cálcicas sódicas), y varias muestras correspondientes a la fuente Mil Cubres y los pozos 1, 2, 3, 4 y 13 (aguas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas sódicas). Finalmente, se presentan agrupados entre sí y con una disimilitud muy acentuada con respecto a los restantes grupos, dos muestras del pozo 4 (aguas bicarbonatadas cloruradas sódicas).

Del análisis de los resultados obtenidos mediante análisis factorial de variables (Fig. 6), se llega a las siguientes conclusiones:

- Aparecen definidos 3 factores que controlan las propiedades químico-físicas de las variables analizadas. De ellos los dos primeros están bien definidos, con una contribución de 49.2 y 25.8 % de varianza total respectivamente (75 % de la varianza acumulada), mientras que el tercero no debe tomarse en consideración dada su menor contribución a la varianza total (tabla 16). Para el total de datos utilizados (N = 22), se

considera significativa un correlación mayor de 0.7 entre la variable y el correspondiente factor (Tab. 16). Así, presentan correlaciones (directas) significativas con el primer factor las variables TSS, CO_2 , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CaCO_3 y H_2SiO_3 , mientras que con respecto al segundo factor presentan correlaciones (inversas) significativas CO_3^{2-} , Cl^- y Na^+K^+ .

- El primer factor (F1) está relacionado por el drenaje profundo del medio cársico (calizas fétidas de la Formación Artemisa), al cual se asocian fundamentalmente las variables señaladas junto a la Temperatura. En su conjunto, estas variables son características de las aguas termominerales.

- El segundo factor (F2) parece representar en la parte negativa del eje, el medio no cársico (Formación San Cayetano), al cual se asocian las variables Na^+K^+ , HCO_3^- y CO_3^{2-} . La presencia del H_2S y el HCO_3^- y CO_3^{2-} unidos a este factor, pudiera interpretarse a partir del aporte de las piritas y calcopiritas (polimetales) presentes en la Formación San Cayetano. En la parte positiva de ese mismo eje, parece estar representado el medio cársico somero.

- El tercer factor (F3) no presenta correlaciones significativas con ninguna variable, aunque a el se asocian, el contenido de CO_2 de manera positiva y el pH de forma negativa, lo cual está en concordancia con las leyes del equilibrio químico de los sistemas $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CaCO}_3$ y $\text{FeS}_2\text{-O}_2\text{-SO}_4^{2-}\text{-H}_2\text{S}$. Por no presentar correlaciones significativas ha sido excluido de este análisis.

En la figura 7 se muestra la posición que ocupan los datos con respecto a los dos factores principales. En general, se aprecian 3 grupos de aguas con composiciones extremas, ubicadas el primero, en la parte positiva del eje correspondiente al factor I (representado por las aguas minerales del pozo 1 muestreadas a partir de los 240 m); el segundo situado en la parte negativa del eje correspondiente al factor II, constituido por muestras del pozo 4 (agua bicarbonatadas cloruradas sódicas), y un tercer grupo, ubicado en la parte positiva de este mismo eje, con muestras de la fuente Mil Cumbres y de los pozos 2 y 3 (aguas bicarbonatadas cálcicas).

Entre estos tres grupos principales se sitúan las restantes muestras, lo cual indica contribuciones en mayor o menor proporción de los miembros extremos. Así las aguas de las fuentes El Tigre, El Templado y La Gallina se ubican entre las posiciones que ocupan las aguas sulfatadas cálcicas y bicarbonatadas cálcicas, mientras que las fuentes del sector Bermejales, el Pozo 12 y una muestra del pozo 4 (145-195 m), las cuales se corresponden con aguas con un relativamente alto contenido de sulfato, calcio y sodio, se sitúan en un espacio intermedio entre los sitios que ocupan las aguas del tipo sulfatadas cálcicas y las aguas del tipo bicarbonatadas cloruradas sódicas. Finalmente, el pozo 13, ocupa una posición entre las aguas bicarbonatadas cálcicas y las bicarbonatadas cloruradas cálcicas. Todos estos resultados son coherentes con los obtenidos por análisis de cluster y otros métodos empleados anteriormente.

Tabla 16. Correlación entre los factores y las variables seleccionadas y porcentaje de variancia extraída por los factores principales.

	Factor 1	Factor 2
Temperatura	.670300	-.332906
PH	-.694345	-.451322
TSS	.894376	-.352898
CO₂	.711977	.235433
HCO₃	-.297662	-.579176
CO₃	-.501287	-.783327
CL	-.050714	-.859324
SO₄	.938829	-.145137
Ca	.958817	.005728
Mg	.899041	-.205828
Na+K	-.133469	-.856495
CACO₃	.963609	-.027339
H₂S	.139491	-.543645
H₂SiO₃	.786784	-.314189
Expl.Var	6.774545	3.374026
Prp. Totl.	.483896	.241002

	Eigenval	% Total Variance	Cumul. Eigenval	Cumul. %
1	6.77	48.39	6.77	48.39
2	3.37	24.1	10.14	72.49

IV.2.4 ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DEL EQUILIBRIO TERMODINÁMICO DE LAS AGUAS, RESPECTO A DIFERENTES MINERALES.

Como se discutió en el capítulo II, debe esperarse que un agua mineral que ha recorrido un largo camino hasta su emergencia en la fuente o pozo desde donde se extrae, se encuentre en equilibrio termodinámico a la temperatura y presiones de vapor presentes. En las tablas 17-23, se presentan los resultados del procesamiento por HIDROWIN [12] de un número de datos hidroquímicos representativos de las fuentes y pozos del sistema hidrotermal San Diego de los Baños – Bermejales. En ellas se puede apreciar que las aguas muestreadas en las fuentes del sector San Diego, así como la de los pozos, tomadas en los diferentes horizontes acuíferos se encuentran saturadas o sobresaturadas con respecto a los minerales calcita, aragonito, dolomita y cuarzo, mientras que las mismas se encuentran subsaturadas con respecto al yeso, la anhidrita y la calcedonia. Solamente algunas muestras aisladas, fundamentalmente aguas de baja mineralización, se encuentran subsaturadas con respecto a calcita y dolomita.

A medida que aumenta el contenido de sulfato en las aguas minerales, éstas tienden a encontrarse cercanas a la saturación con respecto al yeso. Un distanciamiento del equilibrio con respecto a este mineral en las aguas sulfatadas cálcicas, acompañado de un alto contenido de H₂S puede ser indicativo del predominio de procesos de reducción de sulfatos.

IV.2.5 MODELACIÓN GEOQUÍMICA.

De los estudios realizados mediante la utilización de técnicas de reconocimiento de patrones hidrogeoquímicos, métodos de balance de masas, análisis de cluster y análisis factorial, se puede arribar a un modelo geoquímico que permita explicar la composición química de las aguas de las fuentes y pozos (a los diferentes niveles) del sistema hidrotermal San Diego de los Baños-Bermejales. Esta composición tan variada refleja un fuerte control litológico y estructural, así como la presencia de procesos de mezcla de agua. Los principales procesos que determinan el modo de adquisición de la composición química de las aguas en esta región han sido resumidos esquemáticamente en la tabla 4. No obstante, en este acápite se discutirán en forma detallada, estas reacciones químicas que dan lugar a dichos procesos geoquímicos.

La Figura 8 representa un corte esquemático generalizado sobre el área de desarrollo de las fuentes y pozos del sistema hidrotermal San Diego-Bermejales. Como puede apreciarse en la figura los acuíferos desarrollados en calizas de la Fm. Artemisa hasta una profundidad de 300 m, cuando no interactúan con otro tipo de litología (pozo 3, desde 40 hasta 290 m), poseen aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas, las cuales pueden originarse principalmente, por procesos de disolución de calizas por parte de las precipitaciones que se infiltran y en su camino toman del suelo un determinado contenido de CO₂ de origen biogénico, el cual, en determinados casos, también puede ser aportado por los fluidos hidrotermales:



Calcita

Conjuntamente a la disolución de la calcita se produce la disolución de la dolomita, que en cierta proporción acompañan a aquella en la composición de las calizas:



Dolomita

Los horizontes acuíferos desarrollados en areniscas, esquistos y pizarras de la Fm. San Cayetano (pozo 4 desde los 100 m), donde el material rocoso está constituido, principalmente, por minerales de tipo aluminosilicatos y cuarzo, presentan aguas del tipo bicarbonatadas sódicas, cuya composición puede explicarse mediante un proceso de meteorización donde intervienen las precipitaciones y el CO₂ en forma similar al proceso anterior. La disolución de estos minerales es incongruente (se produce con deposición de otro mineral) y se favorece con la temperatura, por lo que la mineralización tiende a aumentar con la profundidad en virtud del gradiente geotérmico:



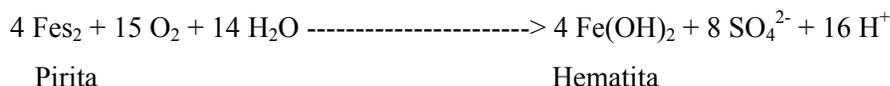
Albita

Caolinita

La meteorización de los feldespatos sódicos, constituidos por minerales albita y otros similares origina en la fase líquida, aguas bicarbonatadas sódicas ricas en sílice mientras que en la fase sólida se deposita caolinita y cuarzo.

En las zonas de contacto tectónico, constituida por brechas y un melange de aluminosilicatos y calizas, las aguas pueden adquirir su composición por combinación de los procesos geoquímicos anteriores (pozo 2 a diferentes profundidades).

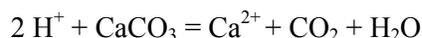
Las aguas de las fuentes y las de los horizontes acuíferos que cortan las grietas y fisuras de la Falla San Diego de los Baños son del tipo sulfatadas cálcicas de alta mineralización, lo que al parecer está relacionado con los flujos hidrotermales ascendentes. La composición de estas aguas puede explicarse mediante procesos de oxidación de piritas:



El oxígeno necesario para esta reacción puede ser aportado por la materia orgánica presente en las calizas de la Fm. Artemisa, Estas rocas son fétidas debido a la presencia de sulfhídrico, al parecer ocluido en las mismas (Embil, 1947) en [18, 19, 20]. La presencia de piritas pudiera estar relacionada con el material carbonoso y fétido de estas calizas (Peláez, 1990) en [45] o con polimetales constituidos por piritas y calcopiritas, presentes en la Fm. San Cayetano, la cual forma parte de las capas impermeables que limitan el acuífero confinado. La ocurrencia de aguas sulfatadas cálcicas en muchos sistemas termales se debe a los procesos de disolución de yeso o anhidrita (Lopez-Chicano y Pulido-Bosch, 1996) en [23], pero la presencia de estos minerales no ha sido reportada en los sedimentos de la Sierra del Rosario [1].

Los procesos de oxidación de piritas pueden originarse durante la lenta percolación de las aguas hasta el acuífero profundo, utilizando el oxígeno disponible en las grietas de este sistema cársico. En profundidad puede enriquecerse el contenido de pirita en el contacto entre los sedimentos carbonatados de la Fm Artemisa y los sedimentos de la Fm. San Cayetano, a los cuales se encuentran asociados los minerales polimetálicos que abundan en la provincia de Pinar del Río.

La disolución de las piritas se produce con liberación de una cantidad apreciable de iones H^+ , los cuales pueden reaccionar con los carbonatos formando sulfato de calcio y CO_2 :



Estequiométricamente, la cantidad de sulfato de calcio obtenida por oxidación de pirita es similar a la obtenida por disolución de yeso, por lo que no es posible discernir entre la ocurrencia de uno u otro proceso a partir de la información hidroquímica. En su ascenso las aguas sulfatadas cálcicas sufren procesos biogeoquímicos, reduciéndose parte del sulfato a sulfuro, con la participación de bacterias reductoras de azufre (Bitton, 1990) en [23] originándose H_2S , HS^- y azufre coloidal en dependencia del pH y el potencial redox.

La evolución de la composición química del pozo 4 puede ser explicada por la combinación de los procesos geoquímicos de disolución de calizas, de oxidación reducción y de mezcla de aguas.

En las fuentes El Tigre y El Templado, así como en algunos horizontes acuíferos se observan aguas del tipo sulfatadas bicarbonatadas cálcicas, cuya composición, como ha sido demostrado por reconocimiento de patrones, balance de masas y mediante métodos estadísticos bivariados y multivariados, pudiera atribuirse a

mezclas entre aguas sulfatadas cálcicas procedentes del drenaje profundo y aguas del tipo bicarbonatadas sódicas más someras. Otras facies hidroquímicas presentes en algunos pozos, a una determinada profundidad, pueden ser explicadas por mezclas de diferentes tipos de aguas (bicarbonatadas cálcicas con bicarbonatadas sódicas, bicarbonatadas cálcicas con sulfatadas cálcicas y estas últimas con bicarbonatadas sódicas).

En la figura 9 se presentan, en forma esquemática, las principales facies hidroquímicas presentes en el sistema hidrotermal San Diego de los Baños-Bermejales, así como los principales procesos químico-físicos (disolución de calcita, dolomita y albita, oxidación de pirita y reducción parcial de sulfato) y de mezcla de aguas que explican los diferentes tipos de aguas presentes en el mismo.

IV.2.6 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA DE LOS ACUÍFEROS PROFUNDOS.

En la tabla 24 se presentan los resultados de los cálculos realizados con un grupo de geotermómetros cuantitativos: SiO₂, Na-K, Na-K-Ca, Na-Li, Mg-Li, Na-K-Ca-Mg. En ella puede apreciarse que los geotermómetros a base de SiO₂ cristobalita α y calcedonia dan temperaturas del reservorio profundo inferiores a la temperatura de la fuente y los geotermómetros de SiO₂ amorfo y cristobalita β dan temperaturas por debajo de cero, lo cual es totalmente absurdo. Los resultados obtenidos por estos métodos indican que no son esas fases las que se encuentran en equilibrio con el reservorio. Los resultados utilizando SiO₂ a base de cuarzo dan valores aceptables, aunque debe destacarse que este método se afecta sensiblemente cuando existen mezclas de aguas, siendo eficiente para determinar la temperatura del último equilibrio del agua con los minerales de SiO₂ del medio ambiente. En el caso en que existan mezclas, la temperatura estimada será por tanto inferior a la del acuífero más profundo.

Tabla 24. Valores de las temperaturas (°C) de los acuíferos básicos que alimentan las fuentes de los sectores San Diego de los Baños y Bermejales, determinadas mediante diferentes geotermómetros.

No	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	- 48	12	- 32	29	61	67	18	- 8	123	50	111	102	99
2	- 43	18	- 27	35	67	72	19				84	- 6	
3	- 26	38	- 8	57	88	90	31				206	135	127
4	- 43	17	- 27	35	67	72	19	5	176	108	144	111	104
5	- 39	22	- 22	40	72	77	16				159	115	90
6	- 46	14	- 30	31	63	69	19				195	129	67
7	- 45	16	- 29	33	65	70	17				113	107	65
8	- 39	22	- 22	40	72	77	16				184	126	58
9	- 46	14	- 30	31	63	69	13				182	126	35

Fuentes San Diego de los Baños: (1, 2) El Templado; (3) El Tigre; (4, 5) La Gallina, Fuentes Bermejales: (6) M1, (7) M3, (8) M4, (9) M5.

- | | |
|------------------------------------|--------------------|
| A. SiO ₂ amorfo, | H. Mg-Li |
| B. SiO ₂ cristobalita α | I. Na-Li |
| C. SiO ₂ cristobalita β | J. Na-Li Cl < 1000 |
| D. SiO ₂ calcedonia | K. Na-K |
| E. SiO ₂ curazo | L. Na-K-Ca |
| F. SiO ₂ curazo vapor | M. Na-K-Ca-Mg |
| G. Na K- | |

Los resultados obtenidos por el método Na-K también dan valores muy bajos, por lo que debe desecharse por razones similares. A pesar de que este método se afecta menos por la mezcla de aguas, como se ha señalado con anterioridad, las estimaciones difieren en ocasiones con la realidad (Urbani, 1991) [56].

Los geotermómetros a base de Li se consideran más fiables que otros para temperaturas inferiores a 100 °C. Sin embargo, las estimaciones pueden afectarse en caso de mezcla. Los resultados obtenidos mediante el geotermómetro Mg-Li (tabla 23) son muy bajos, al igual que los de Na- K, lo cual pudiera atribuirse al poco contenido de Li y Mg^{2+} en las muestras, del orden del error analítico.

Sin embargo, los resultados de los cálculos mediante el geotermómetro Na-Li parecen más confiables y pudieran ser tomados en cuenta en esta discusión. Estos valores son relativamente más altos que los determinados por los geotermómetros de SiO_2 (cuarzo). En el caso del método de Na-Li para Cl⁻ menor de 1000 °C, el valor obtenido para el fuente El Templado resultó ser demasiado bajo. De todos modos, solo dos muestras poseen contenidos de Li, por lo que, de todas formas, resultan insuficientes los resultados obtenidos mediante los geotermómetros a base de este elemento.

Los cálculos efectuados con los geotermómetros Na-K y Na-K-Ca arrojan, por lo general, valores de temperatura base más elevados que los calculados por el método de SiO_2 (cuarzo), mientras que el geotermómetro Na-K-Ca-Mg brinda estimaciones más cercanas a la del cuarzo. La experiencia mundial es que este último método da buenos resultados para reservorios con temperaturas entre 150 y 200 °C, pero casi siempre da valores más elevados que los reales para reservorios con temperaturas menores (Urbani, 1991) [56].

Por el método geotermométrico Na-K-Ca-Mg, el cual se recomienda para corregir las estimaciones del método Na-K-Ca cuando $T > 70$ °C y $R < 50$, da temperaturas del mismo orden o ligeramente más altas o más bajas que las calculadas por el método de SiO_2 (cuarzo).

Como resultado del análisis de las ventajas y limitaciones de los diferentes geotermómetros y a partir de los valores más concordantes obtenidos, se pueden seleccionar como resultados más confiables los que se exponen en la tabla 25.

Tabla 25. Resultados más aceptables de las temperaturas de los acuíferos profundos que alimentan los fuentes de San Diego de los Baños y Bermejales.

Fuente	Temperaturas (°C)			
	Na-K-Ca-Mg	SiO ₂	R ₁	R ₂
El Templado	99	61-67	90-127	61-90
El Tigre	127	88-90		
La Gallina	90-104	67-77		
M 1	67	63-69		63-77
M 3	65	65-70		
M 4	58	72-77		
M 5	35	63-69		

R₁: Reservorio más profundo; R₂: Reservorio más superficial

IV.2.7 MODELACIÓN GEOTÉRMICA

Del análisis de la tabla 24 se infieren que las aguas que alimentan las fuentes de aguas minerales de San Diego de los Baños (El Templado, El Tigre y La Gallina), alcanzan en la base temperaturas del orden de 90-127 °C y en su ascenso se mezclan con otras más superficiales, alcanzando en el reservorio más cercano, entre 61 y 90 °C. Las aguas de los fuentes Bermejales alcanzan temperaturas más bajas en el reservorio (63-77 °C) y ascienden hasta la superficie sin mezclarse.

Los resultados obtenidos son coherentes con el hecho de que las aguas de las fuentes El Templado y El Tigre (San Diego de los Baños) poseen menor mineralización en las emergencias y son del tipo SO₄ > HCO₃ – Ca, lo cual pudiera atribuirse a una mezcla entre aguas del tipo SO₄ – Ca propias de las capas profundas de la Fm. Artemisa, en la zona de falla, con aguas del tipo HCO₃-Na de la Fm. San Cayetano. Las aguas de las fuentes del sector Bermejales, por el contrario, poseen mayor mineralización y son del tipo SO₄ - Ca. Por último, el contenido de Rn, alrededor de cinco veces mayor en San Diego de los Baños que en Bermejales indica, en el primer caso, que las aguas poseen un tiempo mayor de contacto con las rocas del medio geológico.

Conociendo en gradiente geotérmico de una región, la temperatura de los acuíferos profundos (Tr) y la temperatura del agua en la superficie (Ts), es posible estimar la profundidad de los reservorios (Px) a la cual descienden las aguas de infiltración mediante la expresión:

$$\frac{4 \text{ }^{\circ}\text{C}}{100 \text{ m}} = \frac{\text{Tr} - \text{Ts}}{\text{Px}}$$

El flujo de calor desde el interior hacia la corteza terrestre es anormalmente elevado, del orden de 15-30 °C, en áreas asociadas a procesos de extensión o separación de placas, de choque de placas (subducción) y de actividad distensiva dentro de una placa, donde existen fenómenos geológicos notables: actividad sísmica

elevada, orogenia con formación de cordilleras en épocas geológicas recientes y actividad volcánica notable (Morell, 1995) en [35]. En esas regiones el gradiente geotérmico alcanza valores entre 15-30 °C por cada 100 m. Otros procesos que pueden generar calor son, por ejemplo: fricción mecánica entre los labios de fallas y disipación de calor debido a una intrusión magmática. Por otro lado, en zonas caracterizadas por su estabilidad tectónica, donde el flujo de calor bajo, el gradiente geotérmico puede variar entre 2-4 °C.

Tomando en consideración las mediciones de temperatura efectuadas por Peláez et al. (1990) [45] en un perfil de pozos, a diferentes profundidades, se puede establecer que el gradiente geotérmico en la región estudiada es del orden de 6 °C por cada 100 m.

En la tabla 26 se muestran los resultados de los cálculos de la profundidad alcanzada por las aguas, realizados bajo las premisas anteriormente señaladas.

Tabla 26. Estimación de la profundidad alcanzada por las aguas en los reservorios que alimentan los fuentees de San Diego de los Baños y Bermejales.

Fuentees	Profundidad (m)	
	R₁	R₂
San Diego de los Baños	1208	658
Bermejales		567

Los resultados obtenidos mediante el modelo geotérmico son, en parte coherentes, con los resultados obtenidos mediante los modelos hidrogeoquímicos y análisis estadísticos presentados con anterioridad. La diferencia radica en que en estos últimos la composición química de las aguas de las fuentes La Gallina y las fuentes del sector Bermejales, se explica mediante mezcla de aguas en proporciones aproximadas de un 70 % del componente profundo (aguas sulfatadas cálcicas) y de un 30 % del componente somero (aguas bicarbonatadas cálcicas y sódicas), por su parte la composición química de las fuentes El Templado y El Tigre, se explica mediante proporciones de 30 y 70 % de dichos componentes (profundo y somero), respectivamente, mientras que por el modelo geotérmico, solo se explica, en forma satisfactoria, las mezclas de las fuentes del sector San Diego de los Baños, asumiendo que en el sector Bermejales no intervienen mezclas de agua.

En la figura 10 se ilustra, en forma esquemática, el modelo geotérmico del sistema hidrotemal San Diego de los Baños–Bermejales.

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS