

**GEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE  
LA PROVINCIA DE LAS TUNAS**

**Tesis presentada en opción al grado  
científico de Doctor en Ciencias  
Químicas**

**Autora: MsC. Vilma Monteagudo Zamora**

**Profesor Auxiliar**

**Tutores: Dr.C Juan Reynerio Fagundo Castillo**

**Investigador Titular**

**Las Tunas 2008**

## **DEDICATORIA**

A Fidel Castro Rúz, artífice del hombre nuevo y capaz de demostrar que un mundo mejor es posible.

A todos los humanos que demostraron ganas de andar en esta investigación.

A los hombres y mujeres que abrieron sus deseos de hacer ciencia en el ISP "Pepito Tey".

A los que me entendieron en instantes de desesperos y malos momentos, pero todo desde el corazón. Gracias.

## **AGRADECIMIENTOS**

A lo humano que debemos ser en todos los espacios de la vida, momentos como los vividos por mí en esta investigación es la especial manera de entenderlo, por ello agradezco a cada uno de los que me miraron, me escucharon, me abrazaron, me olvidaron o me siguieron. Gracias, a un ser especial, que desde su grandeza fue tan cercano y vital para mí, Dr. Juan Reynerio Fagundo Castillo, Investigador Titular.

## **SÍNTESIS**

Entre los problemas ambientales más relevantes atendidos en el quehacer científico territorial, se encuentran los relacionados con las sequías prolongadas y la contaminación de las reservas naturales de agua. En esta investigación se identifican los procesos geoquímicos que controlan la composición de las aguas naturales en la provincia de Las Tunas. Se aporta una caracterización de las aguas de diferente naturaleza hidrogeológica que se mueven en distintos tipos de acuíferos y se relacionan sus características con las propiedades geológicas e hidrogeológicas de la zona de estudio. Se establecen novedosos métodos de datos hidroquímicos y de información geográfica. Se expresan los resultados mediante diagramas hidroquímicos. Se aplican relaciones matemáticas entre la composición química y parámetros de fácil determinación como: la temperatura, el pH y la conductividad eléctrica y se desarrolla una metodología para la caracterización hidroquímica de acuíferos y cuencas hidrográficas, que permite crear las bases científicas para la aplicación de sistemas automatizados, que hacen posible el monitoreo y control de la calidad de las aguas naturales, haciendo uso racional y buena gestión de este recurso.

## ÍNDICE

### INTRODUCCIÓN..... 1

Problema científico y práctico 2

Justificación de la investigación 2

Hipótesis del trabajo 3

Objetivo general 3

Objetivos específicos 3

Tareas diseñadas para cumplimentar los objetivos de la tesis 4

Aportes de la tesis 4

Aporte económico 5

Aporte social y ambiental 5

### CAPÍTULO I REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA. 6

1.1 Antecedentes y estado actual de la temática 6

1.2 El agua como recurso natural, desde el punto de vista químico-físico, como agente geológico y ambiental 8

1.3 El agua. Composición. Propiedades disolventes 181

1. Auto ionización o disociación del agua 12

2. Disolución y precipitación de minerales 12

3. Disolución de gases 13

4. Hidrólisis 15.

1.4 Disolución de minerales 15

1.5 Proceso de adquisición de la composición química de las aguas naturales  
20

1.6 Variación temporal de la composición química de las aguas naturales	23
1.7 Proceso de disolución e intemperismo de aluminosilicatos	23
1.8 Cinética de las facies de interacción agua-roca	23
1.9 Patrones hidrogeoquímicos y relaciones matemáticas	27
1.10 Evaluación crítica de los modelos químico-físico, hidrogeoquímico y estadístico	29
1.11 Marco geográfico, geológico e hidrogeológico de la provincia Las Tunas	29
<b>CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>33</b>
2.1 Caracterización de la muestra	33
2.2 Muestreo	36
2.3 Análisis químico	36
2.4 Procesamiento de datos hidroquímicos con el uso de modelos químico-físico, hidrogeoquímico y estadístico	38
2.5 Clasificación de las aguas analizadas en Las Tunas	42
2.6 Representación de datos hidroquímicos	42
2.7 Determinación de patrones hidrogeoquímicos	43
2.8 Determinación del origen de la composición química del agua	43
2.9. Metodología para la simulación de los procesos de interacción agua-roca carbonatada	43
2.10. Metodología para el desarrollo de experimentos de lavado de suelos	44
2.11. Metodología para el cálculo de las plagioclasas mediante modelación hidrogeoquímica	46
<b>CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS....</b>	<b>47</b>
3.1 Caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas de Las Tunas	47
3.2 Caracterización hidroquímica espacial	54

3.3 Patrones hidrogeoquímicos de los principales medios geológicos en Las Tunas	55
3.4 Aplicación de los métodos de la estadística bivariada. Análisis de correlación y regresión lineal	74
3.5 Análisis químicos de suelos	67
3.6 Relación entre patrones y procesos hidrogeoquímicos con la litología	69
3.7 Cálculo de las fórmulas de las plagioclasas mediante modelación hidrogeoquímica	109
3.8 Análisis de series cronológicas de variable hidroquímicas	110
3.9 Simulación en el laboratorio de los procesos de interacción agua-roca carbonatada	87
3.10 Estado de las aguas con respecto al equilibrio químico con los carbonatos	8126
3.11 Estimación de la composición química del agua mediante mediciones de conductividad eléctrica y el empleo de modelos de correlación matemática	132

## **CONCLUSIONES**

## **RECOMENDACIONES**

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso natural indispensable para la vida en el planeta, especialmente para el hombre; vital para los servicios de saneamiento, la agricultura, la industria entre otros usos; de modo que ocupa un lugar especial en el desarrollo económico, ecológico y social de cualquier país; es influida negativamente al ser utilizada como cuerpo receptor de contaminantes, causantes de enfermedades y muerte de especies que la necesitan para sobrevivir. Como agente dinámico provoca inundaciones, erosión, sedimentación y salinización; sin embargo, aunque renovable y demandada cada día en cantidades más crecientes, es escasa, ya que sus condiciones naturales de formación y distribución no siempre resultan homogéneas ni en el espacio ni en el tiempo.

En Las Tunas se han utilizado los métodos analíticos convencionales en el estudio de la calidad de las aguas y de los cambios que experimentan éstas como resultado de la actividad del hombre, para evaluarla se cuenta con una red de monitoreo donde se genera un gran volumen de datos, cuyo procesamiento y uso adecuado es de valiosa importancia para la toma de decisiones. Este proceso se hace muy complejo por la carencia de equipos y reactivos químicos necesarios en los laboratorios de control de la calidad.

En la provincia, existen problemas ambientales que requieren ser atendidos en el quehacer científico local, derivados de sequías prolongadas y la contaminación de las reservas naturales de agua, por eso, en la década de los 80 se comenzaron importantes estudios de la naturaleza provincial, entre ellos los trabajos sobre cuencas hidrográficas, S. Mantecón y otros, (1986-1988), que se centraron en el ploteo de pozos en la cuenca La Cana. Otras investigaciones que sirvieron de punto de partida para la continuación de estudios del medio ambiente local, abarcaron temas socioeconómicos, ecológicos y meteorológicos, con énfasis en la protección de las aguas, sin profundizar en las características geológicas, hidrogeológicas y ambientales desde un análisis químico-físico, para su integración óptima en los planes de desarrollo socio-económicos. Se destacan los trabajos de J. Sánchez y P. Suárez, (1985-1990), M. Montaque y T. Becerra, (1996-2003), y T. Becerra y Z.

López, (1997-2002), E. Vázquez y R. Rodríguez, (1999), A. Toledano y M. Montaque, (2001-2002), J. C. Pérez, (2003), Céspedes Pupo, J. C, (2000-2005), C. Saínez y D. Olano, (2003-2005), cuyos resultados han sido presentados de manera aislada a pesar de que ofrecen importantes consideraciones.

En los últimos años se han desarrollado una serie de métodos analíticos y equipos electrónicos novedosos para el monitoreo de las aguas subterráneas y superficiales naturales en lugares de interés económico del país, tales como: ríos, embalses, pozos y otras fuentes, donde es necesario controlar la calidad química y bacteriológica, la salinidad, la mineralización y otros indicadores; por otra parte, el desarrollo de la informática ha permitido la creación de software sencillos e interactivos (**J.R. Fagundo et al, 2006**), que ofrecen a los especialistas, la posibilidad de procesar grandes volúmenes de datos; se ha podido constatar que existen limitaciones en su uso para elevar la gestión de este recurso.

### **Problema científico y práctico**

El insuficiente conocimiento de los procesos geoquímicos que determinan el modo de adquisición de la composición química de las aguas subterráneas en la provincia de Las Tunas constituye el problema científico de esta tesis, por lo que, en el orden práctico, se requiere realizar una caracterización hidroquímica del recurso mediante el empleo de modelos hidrogeoquímicos basados en principios químico-físicos e hidrogeológicos y estadísticos, para obtener información de utilidad hidrogeológica y ambiental que faciliten la toma de decisiones.

### **Justificación de la investigación**

Esta investigación está relacionada con varios proyectos ejecutados en los años 2000-2007, asociados a programas territoriales del CITMA en Las Tunas:

- 1- Programa de Medio Ambiente, que tiene entre sus objetivos el estudio de los recursos naturales de la provincia, con énfasis en los recursos hídricos.
- 2- "Educación. Medio ambiente. Territorio". Proyecto territorial, que desarrolló investigaciones relacionadas con la caracterización químico-física y

bacteriológica de las aguas subterráneas, para definir la calidad y utilización en el desarrollo socio-económico de la localidad.

- 3- "Software para la educación ambiental local", que responde al objetivo # 6 del programa de Ciencias Sociales, orientado a la preparación de la población para el desarrollo sostenible.

Los proyectos asociados a la investigación contribuyen a la capacitación de profesionales para la elaboración de metodologías y recomendaciones que permitan el mejor uso de los recursos hídricos de la provincia, de ahí que su desarrollo con un enfoque más integral sea punto de partida para el uso más racional de las aguas de diferente naturaleza existentes en la provincia de Las Tunas.

### **Hipótesis del trabajo**

A partir de la determinación de patrones hidrogeoquímicos temporalmente estables para la localidad, se facilita la caracterización de las aguas subterráneas y superficiales con el empleo de métodos químico-físicos complejos, las mediciones cuantitativamente sencillas de parámetros de fácil determinación como pH, temperatura y conductividad eléctrica y la utilización de procedimientos informáticos en el procesamiento de datos, para agilizar la toma de decisiones.

### **Objetivo general**

Contribuir al desarrollo de una metodología para caracterizar las aguas subterráneas y superficiales, desde el punto de vista hidroquímico, con el empleo de métodos de simulación en el laboratorio, de los procesos de interacción agua-roca y el procesamiento de datos mediante modelos basados en principios químico-físicos, hidrogeoquímicos y estadísticos.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar desde el punto de vista hidroquímico las aguas subterráneas de la provincia mediante la aplicación de modelos químico-físico, hidrogeoquímico y estadístico en el procesamiento de los datos.

- Determinar los patrones hidrogeoquímicos en términos de composición química de los principales medios geológicos presentes en Las Tunas.
- Simular en el laboratorio los procesos de interacción agua-roca en diferentes condiciones experimentales (la disolución de minerales solubles como los carbonatos en condiciones de sistemas cerrados).

### **Tareas diseñadas para cumplimentar los objetivos de la tesis**

1. Revisión bibliográfica.
2. Caracterizar desde el punto de vista químico-físico las aguas subterráneas en Las Tunas con su clasificación y representación hidroquímica.
3. Realizar experimentos de simulación de los procesos de interacción agua-roca.
4. Aplicar modelos de correlación matemática a datos hidroquímicos de fuentes de abasto que permitan el empleo de un sistema de monitoreo de la calidad hidroquímica de las aguas.
5. Contribuir al desarrollo de una metodología para la caracterización de las aguas subterráneas locales, empleando métodos de simulación en el laboratorio de los procesos de interacción agua-roca y el procesamiento de los datos mediante modelos de tipo químico-físico, hidrogeoquímico y estadístico.

### **Aporte científico**

Se contribuye con nuevos aportes, al desarrollo de una metodología para la caracterización de las aguas subterráneas, la cual se aplica en Las Tunas, que usa como referente el empleo de modelos químico-físico, hidrogeoquímico y estadístico en el procesamiento de los datos obtenidos, que favorece la interpretación de los procesos que originan la composición química de las aguas locales por acción de diferentes factores y crea las bases científicas para la aplicación de procedimientos informáticos, que hacen posible el control de la calidad de las aguas y un uso sostenible de este

recurso natural. La metodología utilizada puede ser aplicada a otras regiones de interés económico del país.

### **Aporte económico**

La metodología racionaliza el estudio analítico al emplear modelos de tipo químico-físico, hidrogeoquímico y estadístico, que permiten mayor integralidad en la interpretación de los datos y más precisión en los resultados; se incrementa el volumen de información que se logra en menor tiempo de trabajo y se favorece la toma de decisiones para el uso del agua en los programas socioeconómicos. Se expresan las relaciones iónicas existentes entre las variables hidroquímicas correspondientes a los grupos de agua determinados en la zona de estudio, que confirman la eficiencia de los métodos analíticos. El método de reconocimiento de patrones favorece el análisis de los tipos de agua presentes en un sistema natural, sus posibles cambios y orígenes. La metodología desarrollada aporta un ahorro de recursos y combustibles, tanto en moneda nacional como en divisa. Su impacto es significativo, porque favorece la actividad socioeconómica de manera general y facilita la toma de decisiones con mayor agilidad.

### **Aporte social y ambiental**

Al favorecer el control de la calidad de las aguas, el resultado evidencia su aporte social, pues contribuye al manejo más efectivo de este recurso natural en el marco de su sostenibilidad como elemento esencial del desarrollo sostenible, entendido como la voluntad de mejorar la calidad de vida de todos, incluida la de las futuras generaciones mediante la conciliación del crecimiento económico, el desarrollo social y la protección del medio ambiente, que es el tipo de desarrollo a que aspira nuestra sociedad y que tiene en su centro la calidad de vida del hombre, vinculada con las necesidades básicas de los seres humanos, y desde este análisis se evidencia que necesidades tales como protección, sustento, recreación y otros, están estrechamente ligadas al agua como recurso y por tanto a su calidad como satisfactor de estas necesidades.

## **CAPÍTULO I. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

En este capítulo se hace un análisis crítico de los antecedentes y estado actual de la temática, se valoran aspectos sobre el agua como recurso natural, se analizan aspectos fundamentales de la química-física del agua que son utilizados en la tesis, se realiza una valoración de los modelos químico-físico, hidrogeoquímico y estadístico, y de las características físico-geográficas, geológicas e hidrogeológicas de la provincia.

### **1.1 Antecedentes y estado actual de la temática**

En Las Tunas, el control de la calidad de las aguas se inició a través de pozos particulares en 1790. A finales del siglo XVIII se construye un pequeño sistema de acueducto muy rudimentario; en la etapa colonial se construyó una red de Aljibes para conservar aguas de las precipitaciones, que eran hervidas y almacenadas en tinajas de barro para mantenerlas frescas y protegidas, **E. Vázquez (2006)**.

En la época republicana el abasto a la ciudad de Las Tunas se realizaba por medio de aguas embotelladas, que provenían de tres pozos principales. El tratamiento de calidad de las aguas subterráneas se garantizaba a través de filtros de rayos ultravioletas, lo que constituyó el primer sistema de tratamiento de aguas en la provincia de Las Tunas. **E. Vázquez (2006)**.

En 1959 la infraestructura hidráulica era insuficiente para soportar la estructura económica y el desarrollo social. Las exigencias del programa de desarrollo del gobierno revolucionario, dio prioridad a un ambicioso plan de construcción de obras hidráulicas, para la protección de vidas y bienes. A partir de este momento, la provincia ha seguido un ritmo ascendente de desarrollo. **A. Aguirre, (2004)**.

Desde 1962 el Instituto Nacional de Recursos hidráulicos (INRH) inicia un trabajo sistemático en la implementación de la red de monitoreo y control de la calidad de las aguas. En 1970 se diseña la red de monitoreo químico-físico y bacteriológico de aguas subterráneas, basado en criterios científicamente argumentados. **O. Beato (2004)**.

Los antecedentes se remontan a las actividades de recolección de muestras, análisis y evaluación, **E. Vázquez, (2006)**. A partir de 1980 se orienta el monitoreo de los principales cuerpos de agua y elementos del ciclo hidrológico, para reflejar las relaciones entre el ecosistema, sus características, el uso de las aguas y su manejo; se determinaron las variables indicadoras de la calidad y la frecuencia de muestreo. **O. Beato, (2004)**.

Desde 1984 la red de calidad del agua ha estado sometida a un proceso de perfeccionamiento continuo; se desarrollan importantes estudios de la naturaleza local. Se detecta la presencia de nitratos y nitritos en la cuenca La Cana, como resultado de la actividad agroquímica en la zona y se toman decisiones que permiten minimizar los impactos producidos. Contribuyen a estos resultados, **S. Mantecón (1986-1988); J. Sánchez y P. Suárez (1985-1990); M. Montaque y T. Becerra (1990-1995); E. Vázquez (1995-1999), En: E. Vázquez (2006)**.

Estos trabajos aportan conocimientos sobre la composición química de las aguas en fuentes de gran importancia para el desarrollo económico y social de la provincia y sirvieron de base para la continuidad de los estudios en otras zonas. No obstante, los resultados carecen de una integralidad en la interpretación de los datos que se generan en los laboratorios de control de la calidad, lo que limita la toma de decisiones oportunas y ágiles.

En 1990 disminuye la cantidad de estaciones y se analizan las particularidades de cada una de ellas; por dificultades de carácter económico y de base material, los estudios realizados no abarcaron al total de las fuentes; en 1996 comienza la recuperación de forma sostenida y eficiente con el rediseño de una red para el análisis y control de la calidad de las aguas en correspondencia con las necesidades socioeconómicas de la provincia. **O. Beato (2004)**.

La etapa 1996-2005 se caracterizó por la realización de estudios más profundos, sobre la protección de las aguas, su aprovechamiento y el fenómeno de la sequía. Los trabajos realizados por M. Montaque y T. Becerra (1996-2003), en la caracterización químico-física de acuíferos en los municipios solo refieren las

concentraciones de los constituyentes mayoritarios presentes en las aguas y el sodio y potasio no se determinaron por falta de reactivos y equipamiento de laboratorio; no se aprecia un procesamiento de datos que facilite la interpretación de los factores que inciden en la composición química de esas aguas.

En la actualidad, el INRH ejecuta el muestreo y evaluación sistemática de la calidad del agua en Las Tunas, donde se genera un gran volumen de datos que no siempre son interpretados integralmente para definir su uso, lo que limita la efectividad en la gestión de este recurso. El creciente desarrollo científico técnico sitúa, por tanto, ante la necesidad y posibilidad de aplicar nuevos procedimientos que favorezcan la toma de decisiones. Los resultados de la investigación que se presentan en esta tesis contribuirán a un uso más racional del recurso agua en la provincia para la toma de decisiones por parte de las autoridades correspondientes.

## **1.2 El agua como recurso natural, desde el punto de vista químico-físico, como agente geológico y ambiental**

Según **C. M. López Cabrera (2002)**, los recursos naturales representan fuentes de riqueza para la explotación económica y su utilización depende del conocimiento que el hombre tenga al respecto y de las leyes que rigen su conservación; se clasifican en renovables y no renovables; dentro de ellos se encuentra el agua, que es el líquido más abundante en la Tierra, el recurso natural más importante y base de toda forma de vida.

En la superficie del planeta los mares y océanos ocupan una elevada proporción (71%) en relación con las tierras emergidas (29%), en estos sitios el agua tiene una alta concentración de sales; la encontramos como aguas terrestres en el subsuelo, en glaciares, lagos, embalses y en ríos. El agua se evapora constantemente hacia la atmósfera, donde se condensa y precipita hacia el suelo en forma de lluvias, nieve o granizo, lo que se conoce como ciclo del agua, con tres procesos fundamentales:

Evapotranspiración: procesos aislados o combinados de evaporación desde el suelo o transpiración de las plantas, mediante los cuales se reincorpora a la atmósfera un elevado volumen de vapor de agua.

Escurrimiento Superficial: el agua fluye por la superficie de la Tierra hasta llegar a los cauces de ríos, arroyos, lagos y el mar; en ese recorrido una parte se evapora y regresa a la atmósfera.

Infiltración: las aguas de lluvia o de escurrimiento superficial alcanzan mayor profundidad de penetración en el subsuelo, lo que incrementa las reservas de agua subterránea, aunque una parte de ellas se pueden escurrir a los ríos o al mar y de ahí volver a la atmósfera por evaporación. **Y. Sosa (2004)**.

Los trabajos realizados por **Coth (2000)**, han demostrado que la diversidad de los fenómenos naturales que se generan por el flujo subterráneo son ilimitados; en consecuencia, dada la gran variedad de los efectos y manifestaciones en los que interviene el agua, precisa su importancia como agente geológico externo fundamental, y considera que se presenta en varias formas:

1. Aguas superficiales: constituyen el agente geológico de primer orden, su acción es especialmente erosiva, depende de la naturaleza de las rocas y del terreno por donde fluyen, de su permeabilidad, de la pendiente y de la vegetación; en su curso por la naturaleza producen erosión, transporte, sedimentación o acumulación.

2. Aguas subterráneas: su acción es mecánica y química, la primera se manifiesta en la erosión de materiales que pueden provocar corrimientos y deslizamientos del terreno. La acción química está dada por la capacidad de disolución del agua sobre la mayoría de las sales que componen los minerales.

Para comprender el comportamiento del agua en la naturaleza hay que considerar los procesos descritos anteriormente, ya que participa en complejas interacciones en su recorrido por la atmósfera y la superficie terrestre, ocasionadas por diferentes fuerzas que actúan sobre la Tierra, para provocar continuos cambios, entre los que se encuentran los procesos endógenos y exógenos; según **Coth (2000)**, la energía necesaria para su ocurrencia procede de dos fuentes fundamentales:

1. La energía solar, que produce diferencias en el calentamiento de la atmósfera y la superficie de la Tierra, hasta provocar desplazamientos de las masas de aire y agua.

2. La energía potencial gravitatoria, que interviene en el movimiento de las masas de agua y el desplazamiento de materiales a favor de la pendiente.

Los efectos combinados de ambas energías modelan el relieve y el paisaje; el ciclo del agua es su consecuencia y el motor de la dinámica externa. **Y. Sosa (2004)**. Estos procesos están relacionados con la atmósfera, constituida por una mezcla de distintos gases como el dinitrógeno, dióxígeno, dióxido de carbono y otros contenidos en el aire como el dihidrógeno y el vapor de agua. Su acción ejerce una influencia sobre la evolución de los procesos geológicos que tienen lugar en la superficie de la Tierra, por lo que constituyen el factor decisivo en la destrucción de las rocas, de ahí la importancia de los procesos de meteorización o intemperismo y de erosión.

**J. Tóth (2000)**, considera al proceso de meteorización como la acción geológica ejercida por la atmósfera sobre las rocas, donde los procesos físicos y químicos actúan de manera continua, y define la meteorización química como el resultado de la interacción de las rocas con las sustancias químicamente activas de la atmósfera y la biosfera que se disuelven en el agua, tales como: el  $O_2$ , el  $CO_2$  (ac) y los ácidos orgánicos; los procesos principales que ocurren son: de intercambio iónico, de oxidación-reducción, de hidratación, de disolución e hidrólisis.

Los organismos vivos desempeñan otra importante función, interactúan con distintos componentes del medio, para modificar la estructura de las rocas. El agua interviene en los procesos descritos anteriormente, transformando y transformándose, altera los minerales primarios, para formar los minerales secundarios, y se comporta como agente geológico de carácter general.

Su papel activo en la naturaleza se debe a dos causas, su capacidad para interactuar con el Medio Ambiente y a la distribución espacial del flujo subterráneo, las cuales tienen lugar simultáneamente y a cualquier escala de lo espacial o temporal; así el flujo se produce desde la superficie hasta las grandes profundidades y desde escalas de un día hasta tiempos geológicos, por eso, se identifican tres tipos principales de interacción:

1. Interacción química: el agua origina diferentes fenómenos naturales mediante procesos de disolución, cristalización, hidratación, hidrólisis, oxidación-reducción, precipitación, intercambio iónico, reducción de sulfatos, concentración y mezclas de agua.
2. Interacción física: el agua origina procesos de lubricación y modificación de las presiones intersticiales y procesos cinéticos de transporte de sustancias disueltas, sólidos en suspensión y energía.
3. Interacción biológica: como elemento vital, el agua se vincula al surgimiento y desarrollo de la vida que a su vez, modifica el hábitat de los organismos vivos.

La acción del agua en los fenómenos anteriormente estudiados está condicionada por sus propiedades, las que se analizan a continuación.

### **1.3 El agua. Composición. Propiedades disolventes**

El agua contiene 11,2% de oxígeno y 88,8% de hidrógeno, es indudablemente, uno de los compuestos más difundidos en la naturaleza; en estado líquido es un disolvente excepcional, lo que tiene su explicación en la propia sustancia, en su composición y en su estructura. Diferentes autores coinciden en este criterio. **B. V. Nekrasov (1981); R. León (1991); Y. Sosa (2004); O. Beato (2004)**, y han explicado su comportamiento a partir de este principio.

Otros investigadores, **Davis y De Wiest (1966); L. Sánchez (2000); P. González (2003); M. Rodríguez (2005); T. Leonarte (2005); O. Beato (2006)**, se han apoyado en las propiedades del agua para explicar su actuación como disolvente universal de los minerales, al realizar estudios en condiciones naturales de distintas localidades, lo que ha permitido comprender la forma en que ella adquiere su composición química y su relación con el medio geológico drenado (**J. R. Fagundo et al, 2007; 2007b**).

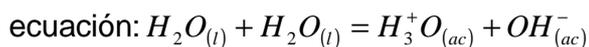
Algunos autores consideran que la conductividad eléctrica específica (CE), expresa la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica y es directamente proporcional a la concentración iónica. Coinciden con este criterio, **R. Acevedo (1991); J. R. Fagundo (1998); T. Leonarte (2005); O. Beato (2007)**, quienes han explicado la

variación de la composición química del agua en el tiempo a partir de esta importante propiedad.

Desde el punto de vista químico el agua es una sustancia extraordinariamente activa, se combina con muchos óxidos de metales y de no metales, reacciona con metales activos y forma parte de muchas reacciones del más variado carácter. Se analizan a continuación diferentes manifestaciones de las propiedades químicas del agua.

### 1. Auto ionización o disociación del agua

La elevada polaridad de las moléculas de agua ocasiona su disociación en los iones correspondientes ( $H_3^+O$  e  $OH^-$ ), la cual se expresa a través de la siguiente



Ácido      Base

Si se aplica la Ley de Acción de Masas se obtiene que:  $K_c = \frac{c(H_3^+O) \cdot c(OH^-)}{(H_2O)^2}$

En la que:  $K_{H_2O} = c(H_3^+O) \cdot c(OH^-) = 10^{-7} \cdot 10^{-7} = 10^{-14}$  a 25 ° C.

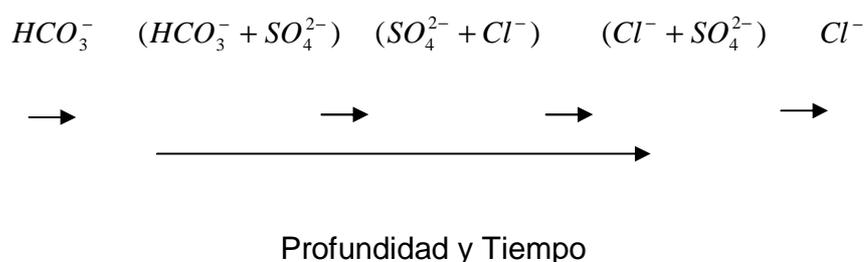
En la naturaleza las aguas son disoluciones acuosas muy cercanas a la neutralidad en las que el pH se encuentra en un rango entre 6 y 8 unidades. Muchas de las propiedades químicas del agua, se manifiestan a partir de la auto-ionización por transferencia de protones, que representa uno de los mecanismos químico-físicos más importantes para explicar su comportamiento como medio estabilizador del pH.

### 2. Disolución y precipitación de minerales

Los cambios en la composición química del agua están caracterizados por dos procesos químicos principales: la disolución y la precipitación de minerales; ambos son importantes en la descomposición de las rocas por la acción conjunta del agua, el  $CO_2$  (ac) y los ácidos orgánicos. Una vez disueltos los minerales halogenados, sulfatados y carbonatados, precipitan solo si se mezclan con otras sustancias o se cambian las condiciones ambientales de temperatura y presión.

Las sales más importantes y abundantes en las aguas subterráneas naturales son: el carbonato de calcio, presente en la calcita; el carbonato de calcio y magnesio, en la dolomita; el carbonato de magnesio, en la magnesita; el cloruro de sodio, en el mineral halita, el sulfato de calcio anhidro, en la anhidrita y el sulfato de calcio dihidratado, presente en el yeso. Según **O. Beato (2007)**, los iones predominantes en las aguas naturales son:  $Ca^{2+}$ ;  $Mg^{2+}$ ;  $Na^+$ ;  $Cl^-$ ;  $SO_4^{2-}$ ;  $HCO_3^-$

Estos autores, consideran que durante la infiltración en el subsuelo y debido a los procesos químicos de disolución y precipitación, las aguas pueden sufrir un fraccionamiento iónico o evolución química; la tendencia general de la distribución iónica en la profundidad y en el tiempo generalmente presenta la configuración:



### 3. Disolución de gases

Según **Y. Sosa (2004)**, los gases constituyentes del aire, el dióxido de carbono ( $CO_2$ ), el dioxígeno ( $O_2$ ) y el dinitrógeno ( $N_2$ ), son de gran importancia en el estudio del agua; la disolución del ( $O_2$ ) es imprescindible para la vida acuática, sin embargo, la solubilidad de los gases en agua depende de su naturaleza, de la presión en el equilibrio y de la temperatura, proceso exotérmico que responde a la Ley de Henry. **L. E. Ramos Guadalupe (2003)**.

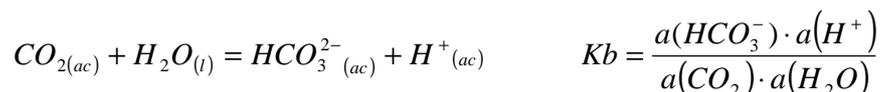
La cantidad de  $CO_2$  (g) en la atmósfera es del 0,033 %, este gas se disocia en agua como ácido, según los equilibrios:  $CO_{2(ac)} + H_2O_{(l)} = H_3O^+_{(ac)} + HCO_3^-_{(ac)}$

$CO_{2(ac)} + H_2O_{(l)} = H_3O^+_{(ac)} + CO_3^{2-}_{(ac)}$ . Este ácido presenta dos constantes de disociación, una para cada protón, al ceder el primero adquiere cierto carácter ácido, pH ligeramente inferior a 7, lo que explica el poder agresivo del agua en contacto

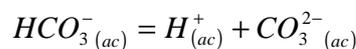
con las rocas de la corteza terrestre. Este proceso se representa por las siguientes etapas:

a) Difusión del  $CO_2$  (g) en agua durante las precipitaciones:  $CO_{2(g)} = CO_{2(ac)}$

b) Formación de la disolución de  $CO_2$  durante las lluvias o en la atmósfera del suelo:



c) Disociación del ácido carbónico:  $CO_{2(ac)} + H_2O_{(l)} = H^+(ac) + HCO_3^-(ac)$



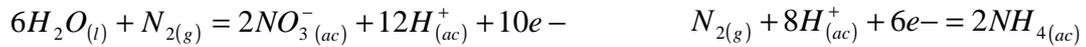
Las constantes de equilibrio son:  $K_1 = \frac{a(H^+) \cdot a(HCO_3^-)}{a(CO_2) \cdot (H_2O)}$   $K_2 = \frac{a(H^+) \cdot a(CO_3^{2-})}{a(HCO_3^-)}$

El dióxígeno representa el 20 % de los diferentes gases que conforman el aire, su solubilidad en agua es de  $1,5 \cdot 10^{-3}$  mol/L y se combina con ella para oxidarla, según el siguiente equilibrio:  $2H_2O_{(l)} + O_{2(g)} + 4e^- = 4OH^-(ac)$ ; esta media ecuación representa la reducción del  $O_2$  en el par  $O_2/OH^-$ . El agua se comporta como agente oxidante, según la ecuación:  $2H_2O_{(l)} + 2e^- = 2OH^-(ac) + H_{2(g)}$ , en medio básico ó  $2H^+(ac) + 2e^- = H_{2(g)}$ , en medio ácido.

Si se aplica la Ley de Nerst se obtiene que:  $E = E^0 - 0,06pH$ ; para presiones de  $1,01 \cdot 10^5$  Pa, **N. Mazola (1991)** se expresa como:  $E = 1,23 - 0,06pH$ , la cual define el potencial del agua de lluvia en función del pH, como consecuencia del oxígeno disuelto en ella. Esta expresión se utiliza para determinar el potencial de electrodo del par  $O_2/OH^-$ , que es igual al potencial  $O_2/H_2O$ .

En el aire el dinitrógeno alcanza el 78,09% del total de los gases y su solubilidad en el agua es aproximadamente de  $10^{-3}$  mol/L, su poca reactividad le impide combinarse con ella; al ser arrastrado por la lluvia hasta el suelo es fijado por los microorganismos, para originar formas oxidadas y reducidas de compuestos

nitrogenados, que se expresan a través de equilibrios químicos que representan los estados de oxidación extremos de los diferentes compuestos nitrogenados:



#### 4. Hidrólisis.

La hidrólisis es la descomposición de un mineral por la acción de los iones hidronio ( $H_3O^+$ ) e hidroxilo ( $OH^-$ ) del agua; en este proceso la red cristalina del mineral se modifica de acuerdo con el cambio de los iones que la integran. El intemperismo de los silicatos, que constituyen el 80% de los minerales de la corteza terrestre, se debe fundamentalmente, a las reacciones de hidrólisis, donde se liberan iones  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  en disolución acuosa. Estos procesos contribuyen decisivamente a la formación de nuevos minerales, por lo que se denomina disolución incongruente.

#### 5. Hidratación.

Según criterios de **O. Beato (2006)**, el proceso de hidratación está acompañado de un aumento del volumen del mineral anhidro al absorber agua, que se traduce en una acción mecánica considerable sobre las rocas hasta provocar alteraciones en ellas como resultado de reacciones químicas, que originan los minerales más estables. La acción del agua es significativa en este proceso, se explica a través del mecanismo químico-físico de formación de iones complejos y de moléculas polares.

##### 1.4 Disolución de minerales

La solubilidad de un mineral en un agua natural obedece a parámetros termodinámicos: temperatura, pH, potencial redox (Eh) y la relativa concentración de otras sustancias en disolución. Estas variables se relacionan en el medio ambiente de manera muy compleja, de modo que no puede predecirse con exactitud la solubilidad de un mineral.

Las leyes químico-físicas que se aplican al agua pura, pueden ser extendidas a los sistemas naturales dentro de ciertos límites. Sus bases teóricas han sido desarrolladas por diferentes investigadores: **G. E. Hutchinson (1957)**; **H. Roques**

(1964); R. M. Garrels y Ch. L. Christ (1965); W. S. Stumm y J. J. Morgan (1970); J. R. Fagundo (1996) y E. Álvarez (1998), T. Leonarte (2005), los que explican la forma en que las aguas adquieren su composición química por influencia de múltiples factores, geológicos, climáticos, antrópicos, entre otros.

La solubilidad de un mineral en agua pura se determina por la constante del producto de solubilidad ( $K_{ps}$ ). El logaritmo inverso de esta constante de equilibrio se conoce como pK, de gran significación geoquímica:  $pK = -\log K$ . Para determinar la concentración de los iones disueltos, la  $K_{ps}$  es un concepto químico-físico muy útil; la ecuación de equilibrio químico toma la forma:  $AaBb = aA^+ + bB^-$ , en la cual  $AaBb$  es la fórmula empírica del mineral y si se aplica la Ley de Acción de Masas:  $K_{ps} = a^a(A) \cdot a^b(B)$ .

En el proceso de interacción con el medio geológico, el agua transforma a las sustancias disueltas en ella, lo que se justifica a través de los mecanismos químico-físicos de cambio de electrones, de cambio de protones y de cambio de iones y moléculas polares, que justifican los equilibrios químicos que se establecen de manera aislada como combinada en medios acuosos.

En la práctica es preciso contar con un sistema redox para que ocurra una reacción química de oxidación-reducción:  $Ox_1 + e^- = Red_1$  y  $Red_2 = Ox_2 + e^-$ . Un oxidante será más fuerte mientras más fácil gane los electrones y cuando el reductor del par redox los ceda con menor facilidad. Su fortaleza se mide por el potencial estándar de electrodo y se expresa en voltios o milivoltios a través de la ecuación de Nerst:  $E_h = E_h^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{(Reductor)}{(Oxidante)}$ , en la cual  $E_h$  es el potencial redox,  $E_h^0$  es el potencial estándar de electrodo, F es la constante de Faraday ( $96,5 \cdot 10^3$  C/mol), **S. Kósel (1986)** y n el número de electrones intercambiados.

Si se expresa el logaritmo en forma decimal:  $E_h = E_h^0 + 0,23 \log \frac{Reductor}{Oxidante}$ , la proporción de iones presentes se deduce a partir de la fórmula:  $pE = -\log(e)$ , en la que pE es una magnitud adimensional análoga a la expresión de pH, utilizada para

describir la actividad del protón hidrógeno. En una disolución mide su tendencia oxidante o reductora, se relaciona con el Eh a 25 ° C por la

$$\text{expresión: } pE = \frac{F}{2.303RT} - Eh \text{ y } E_h = 0,059 pE$$

Los minerales solubles de la corteza terrestre son sólidos inorgánicos, en cuyas estructuras los iones se encuentran formando retículos cristalinos, que el agua, en virtud del proceso de solvatación rompe, para formar disoluciones. La energía de solvatación, propia de cada sustancia, determina que estas se disuelvan en menor o mayor escala para conferirle al agua una determinada calidad. De la mineralización total dependen muchas de sus propiedades. Sin embargo, la mayoría de los efectos sobre el organismo humano se relacionan con el tipo de sustancia presente, tales como haluros, sulfatos y carbonatos, **W. S. Stumm y J. J. Morgan (1970)**.

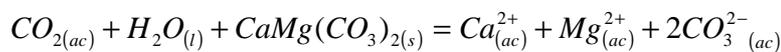
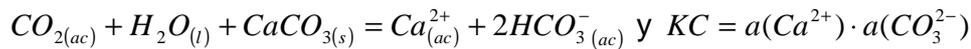
Los haluros abarcan un extenso número de minerales de composición química sencilla, son incoloros o teñidos, sólidos cristalinos de poca dureza, solubles en agua y de aspecto salino característico; los cloruros se encuentran dentro de los minerales solubles más comunes en las aguas subterráneas naturales formando una disolución congruente, como el mineral halita:  $NaCl_{(ac)} = Na_{(ac)}^+ + Cl_{(ac)}^-$ , en la cual  $KH = a(Na^+) \cdot a(Cl^-)$ , donde H se refiere al mineral halita.

Los iones cloruros no participan de manera importante en reacciones redox, no forman complejos disueltos con otros iones, a menos que su concentración sea extremadamente alta, no forman sales de baja solubilidad, excepto los cloruros de  $Pb^{2+}$ ,  $Ag^+$  y  $Hg_2^{2+}$ , no son absorbidos significativamente en la superficie de los minerales, su rol en los procesos bioquímicos vitales es muy pequeño y se encuentran en las rocas como impureza. El tipo de agua donde el cloruro es el anión dominante es aquella donde el sodio es el catión predominante.

Los sulfatos y sulfuros son minerales formadores de rocas sedimentarias, de escasa densidad y poca dureza; entre ellos se encuentran: la anhidrita ( $CaSO_4$ ), la baritina ( $BaSO_4$ ) y el yeso ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), cuya reacción de disolución por el agua natural se

representa:  $CaSO_4 \cdot 2H_2O_{(ac)} = Ca_{(ac)}^{2+} + SO_4^{2-}_{(ac)} + 2H_2O_{(l)}$  y la constante de equilibrio  $KY = a(Ca^{2+}) \cdot a(SO_4^{2-})$ , donde Y es el yeso.

Entre los carbonatos formadores de rocas sedimentarias y metamórficas más abundantes se encuentran la calcita ( $CaCO_3$ ) y la dolomita ( $CaMgCO_3$ ). Las reacciones de disolución se representan por los siguientes esquemas:



$KD = a(Ca^{2+}) \cdot a(Mg^{2+}) \cdot a^2(CO_3^{2-})$ , donde C y D representan a la calcita y la dolomita respectivamente.

La disolución de estos minerales, comprende una serie de procesos físicos y químicos, donde intervienen estados gaseosos, líquidos y sólidos a través de interfases aire-agua-roca; para satisfacer la condición de neutralidad eléctrica de la disolución, la suma de las cargas de aniones y cationes debe ser igual; según el balance de cargas:  $2mCa_{(ac)}^{2+} + mH_{(ac)}^+ = mHCO_3^{-}_{(ac)} + 2mCO_3^{2-}_{(ac)} + mOH_{(ac)}^-$ .

Como las concentraciones de  $CO_3^{2-}$ ,  $H^+$  e  $OH^-$  son despreciables en condiciones habituales, para un  $pH < 8,4$  respecto a la concentración de iones  $Ca^{2+}$  e  $HCO_3^-$ , la expresión anterior se reduce a:  $2mCa_{(ac)}^{2+} = mHCO_3^{-}_{(ac)}$ ; las concentraciones de las especies químicas involucradas en el sistema de equilibrios, se determinan por las ecuaciones de las constantes de equilibrios correspondientes y la de balance de carga, y se asume que la disolución es diluida, de manera que las actividades (a) son iguales a las concentraciones (m).

La concentración del ion  $HCO_3^-$  se calcula por la ecuación:

$$a(HCO_3^-) = \frac{a(CO_3^{2-}) \cdot a(H^+)}{K_2} \text{ y la de } CO_3^{2-} \text{ a partir de: } a(CO_3^{2-}) = \frac{Kc}{a(Ca^{2+})}$$

Si se sustituye el valor de  $mHCO_3^-$  en la ecuación  $2mCa_{(ac)}^{2+} = mHCO_3^-_{(ac)}$ , en función de  $mCO_3^{2-}$ , según la ecuación  $a(HCO_3^-) = \frac{a(CO_3^{2-}) \cdot a(H^+)}{K_2}$ , se obtiene:

$$2a(Ca^{2+}) = \frac{K_c \cdot a(H^+)}{K_2 a(Ca^{2+})}$$

Al despejar  $a(H^+)$  en la ecuación anterior se obtiene:  $\frac{1}{a(H^+)} = \frac{K_c}{2K_2 a^2(Ca^{2+})}$ , que

corresponde a la ecuación teórica mediante la cual se confecciona el diagrama de Tillman-Trombe, que se usa para el cálculo de la agresividad de las aguas cársicas,

**E. Álvarez (1998).** Si se aplica logaritmo se obtiene que:  $pH = -2 \log mCa^{2+} + \log K_2 - \log K_c$

Si en el proceso de disolución de los minerales carbonatados por las aguas subterráneas existe un suministro abundante de  $CO_2$ , constante durante la reacción, este procede rápidamente hasta la saturación y la reacción tiene lugar en condiciones de sistema abierto respecto al  $CO_2$ . Si por el contrario, la disolución de los carbonatos se produce en virtud del suministro inicial de  $CO_2$ , que luego no se repone en el transcurso de la reacción, esta tiene lugar en condiciones de sistema cerrado respecto al  $CO_2$ . En estas condiciones, la cantidad de carbonatos disueltos al alcanzar el equilibrio es menor, mientras que el pH se incrementa más que en condiciones de sistema abierto (**J. R. Fagundo, 1996**).

En la naturaleza predomina la disolución de los carbonatos en sistema mixto. En estas condiciones, las características del sistema difieren del simulado en el laboratorio, debido a la gran variabilidad de dióxido de carbono existente en el medio natural como resultado del aporte irregular y su evolución en el curso.

Cuando aguas de composición química diferente entran en contacto se genera una zona de mezcla o difusión hidrogeoquímicamente reactiva, como consecuencia de la alteración de diferentes parámetros químico-físicos. El desequilibrio de la nueva fase acuosa con las especies minerales presentes en el sistema, conduce a reacciones de precipitación y/o disolución de mineral en la búsqueda de un nuevo equilibrio,

donde la principal consecuencia del proceso de mezcla es la modificación del estado de saturación del agua, **I. Morell (1997)**.

Las reacciones en disolución acuosa son generalmente reacciones entre iones complejos, ya que en estas condiciones todos los iones están hidratados. En el proceso de disolución de los minerales por las aguas subterráneas naturales, además de los iones libres comúnmente conocidos ( $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  y  $K^+$ ), se originan en cantidades muy pequeñas los iones complejos y pares iónicos:  $CaHCO_3^+$ ,  $CaCO_3^0$ ,  $MgHCO_3^+$ ,  $MgCO_3^0$ ,  $NaCO_3^-$ ,  $NaHCO_3^0$ ,  $CaSO_4^0$ ,  $MgSO_4^0$ ,  $NaSO_4^-$ ,  $HSO_4^-$ , que a pesar de su baja concentración, cuando no se consideran en los cálculos cuantitativos de la agresividad de las aguas cársicas, se pueden cometer errores. **(J. R. Fagundo, 1996)**.

### **1.5 Proceso de adquisición de la composición química de las aguas naturales**

En su movimiento superficial o subterráneo, el agua adquiere su composición química mediante un proceso complejo. La composición en cada sitio es el resultado de las interacciones entre fases sólidas, acuosas, gaseosas y la mezcla con otras aguas debido a fenómenos de dispersión y difusión, **C. A. J. Appelo y D. Postma (1993)**, regulados por diferentes factores (geológicos, hidrogeológicos, entre otros), **J. R. Fagundo (1998)**.

Algunos de ellos se hacen constantes, y en esas condiciones la composición química absoluta del agua varía dentro de ciertos límites, como consecuencia del régimen de lluvia, por eso, en períodos lluviosos la mineralización es menor que en los períodos secos. Sin embargo, la composición química relativa varía poco. Se destacan los análisis realizados para explicar, con un enfoque integral, los factores que determinan la composición química del agua, **J. R. Fagundo (1995)**; **E. Álvarez (1998)** y **M. Rodríguez (2005)**.

El uso de relaciones matemáticas entre la concentración iónica y la CE de las aguas subterráneas y superficiales fue propuesto sobre la base de un modelo para la adquisición de la composición química, muy similar al que tiene lugar en el

laboratorio, donde se hace pasar una corriente de CO<sub>2</sub> a un agua destilada por un tiempo determinado y se le añade un mineral carbonatado que ha sido triturado y tamizado. Los fundamentos teóricos para la simulación en condiciones experimentales han sido abordados por **J. R. Fagundo y J. J. Pajón (1987)**; **E. Álvarez (1998)**.

La disolución de un mineral carbonatado está condicionada por la composición de las rocas carbonatadas, su estado de agrietamiento, porosidad, textura y el estado de yacencia de las secuencias estratigráficas. La litología determina, por lo general, el tipo de agua que predomina en una región. Otros aspectos que hay que considerar son el tiempo de contacto de las aguas con las rocas, los tipos de suelos con sus características, el contenido de materia orgánica, sus condiciones pedoclimáticas y la actividad del hombre.

Es importante reflexionar sobre el principio químico-físico del efecto del ion común tratado por distintos autores. **A. Gerstenhauer y R. H. Pfeiffer (1966)**; **R. León (1991)**, para explicar lo que ocurre cuando un agua natural se mueve por un terreno donde existen minerales que contienen iones comunes con los que lleva disueltos en su seno, porque disminuye la capacidad del agua para disolver los minerales presentes en ese sitio y se producen precipitaciones de los mismos.

Al comparar la solubilidad de un mineral en agua pura con la que contiene iones diferentes a los que se originan en el proceso de disolución, se comprueba que la salinidad produce un incremento de la solubilidad de este, ya que al aumentar la concentración aumenta la fuerza iónica ( $\mu$ ) y se produce una disminución del coeficiente de actividad, fenómeno que se conoce como efecto salino o de fuerza iónica. Su estudio es muy útil si se tiene en cuenta que cada localidad tiene características propias. Debido a este efecto en los acuíferos carbonatados con aguas salinas o afectados por la intrusión marina se originan aguas con elevada dureza.

En los experimentos cinéticos de disolución de un mineral, la velocidad depende de la composición química de la roca. La concentración de los principales iones que

resultan de estos procesos, se incrementa en el tiempo siguiendo una función exponencial. Un comportamiento similar presenta la conductividad eléctrica. Al establecer de forma gráfica la relación entre la concentración de cada ion y la conductividad eléctrica, se obtiene una línea recta que pasa por el origen de coordenadas, donde la pendiente depende de la litología, **E. Álvarez (1998)**.

Cuando uno de los factores, geológico, hidrogeológico, antrópico, entre otros, es dominante en el modo en que las aguas naturales adquieren su composición química, las relaciones entre las concentraciones iónicas y la conductividad eléctrica son lineales. Si más de un factor es determinante en este proceso, las ecuaciones de segundo grado se ajustan mejor (**J. R. Fagundo y J. E. Rodríguez, 1992**).

En las aguas subterráneas, cuando se mezclan con el agua del mar por la proximidad de los acuíferos cársicos litorales, su evolución se produce según una serie de patrones hidrogeoquímicos en los que se incrementa progresivamente el contenido relativo de los iones cloruros, sodio y potasio, y en menor medida el magnesio y el sulfato, de esta forma va decreciendo la concentración de iones calcio e hidrogenocarbonato. Otros factores que inciden en la forma de adquisición de la composición química de las aguas subterráneas naturales, están relacionados con la actividad del hombre, principalmente la sobreexplotación de los acuíferos, que provocan una alteración de los patrones hidrogeoquímicos originales (**J. R. Fagundo y P. González, 1999**).

La actividad microbiológica también ejerce un papel determinante. Muchos procesos biogeoquímicos, catalizados por bacterias o microalgas, producen reacciones de redox que en ausencia de las mismas requieren gran cantidad de energía no disponible en el medio ambiente. En estos procesos se producen gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CH}_4$ ), ácidos húmicos y fúlvicos, que facilitan la disolución de los minerales.

Estas aguas pueden ser caracterizadas mediante un conjunto de patrones hidrogeoquímicos, que expresan la relación entre la composición química del agua y la conductividad eléctrica; según los estudios realizados por **E. Álvarez et al (1990)**;

**J. R. Fagundo et al (1992); E. Álvarez (1998); M. Rodríguez (2005)**, la CE es la propiedad químico-física utilizada para ejercer su control.

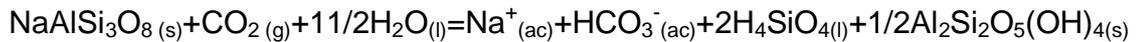
### **1.6 Variación temporal de la composición química de las aguas naturales**

Los cambios temporales en la composición química de las aguas subterráneas naturales se han clasificado en función de la escala de tiempo como: cambios seculares y a corto plazo, en correspondencia con los criterios de **M. Rodríguez (2005)**. A cada una de estas categorías le corresponden cambios de tipo periódico, abrupto y sistemático. Las determinaciones conjuntas de la composición química de las aguas y del caudal, en un determinado sitio a lo largo del tiempo y el registro simultáneo de los elementos del clima, hacen posible correlacionar las respuestas hídrica y química en relación con las precipitaciones.

La variación estacional de la dureza se ha utilizado por muchos investigadores para interpretar la forma en que se mueven las aguas en el carso. **E. T. Shuster y W. B. White (1971)**, propusieron el empleo del coeficiente de variación de la dureza como un índice para determinar si las aguas se mueven en forma difusa o a través de conductos; las que discurren por fisuras y conductos abiertos poseen mayor coeficiente de variación, ya que en esas condiciones el efecto del clima es significativo en la fluctuación de la dureza. En Cuba, además del coeficiente de variación de la dureza se han empleado los de la temperatura y la CE, para distinguir la forma de escurrimiento del agua a través de los macizos cársicos. **J. R. Fagundo et al (2004)**.

### **1.7 Proceso de disolución e intemperismo de aluminosilicatos**

Cuando los productos de una reacción de disolución originan especies iónicas y moléculas sin disolver, se dice que la disolución es incongruente. Este es el caso de muchos aluminosilicatos, como se muestra a través de la ecuación química correspondiente a la disolución de la albita, un aluminosilicato de sodio, que en presencia de  $H^+$  o  $CO_2$  en el agua se disuelve, libera sodio, hidrogenocarbonato y ácido silícico en el seno de la solución, mientras deposita el mineral arcilloso caolinita.



Albita.

Caolinita.

Muchos minerales y sustancias orgánicas en contacto con el agua atraen las moléculas polares hasta su superficie. Este proceso se conoce como adsorción simple, física o fuerzas de Van der Waals, caracterizado por débiles uniones entre el adsorbente y el adsorbido. La adsorción química es una condición fundamental para el intercambio iónico, donde un ion absorbido se intercambia con otro disuelto en el agua, para preservar la estequiometría del mineral. Son los silicatos los que presentan este comportamiento. **I. Morell (1997); O. Beato (2005).**

### **1.8 Cinética de las facies de interacción agua-roca**

El modo en que las aguas naturales adquieren su composición al cabo del tiempo en su trayectoria subterránea, tiene su fundamento en la cinética química. En trabajos relacionados con la calidad de las aguas, no se considera por lo general el papel que juega el factor tiempo en el proceso de disolución de los minerales, se limitan a estudiar la calidad en condiciones de equilibrio.

Sin embargo, el tiempo de reacción junto a la temperatura y el contenido de  $\text{CO}_2$ , son los principales elementos que determinan el proceso de adquisición de la composición química a través de las distintas fases presentes: gas, líquido y sólido, ya que el contenido de  $\text{CO}_2$  en un momento dado, es el resultado de la acción del tiempo y de las condiciones geológicas anteriores, de modo que se producen una serie de efectos, que dependen de las condiciones físicas, químicas y cinéticas a escala local, **J. R. Fagundo et al (2004).**

Si la composición de las aguas subterráneas está gobernada por su interacción química con los sólidos del acuífero, se deben considerar dos tipos de controles de la composición: por leyes del equilibrio químico y de la cinética química. La etapa de la interacción del agua con el sólido, antes de que se alcance el equilibrio, debe ser estudiada desde el punto de vista cinético, donde las velocidades de reacción dependen de factores como el tamaño de las partículas, la agitación, la temperatura, los flujos y la distancia al equilibrio. La termodinámica, que usa como herramienta al

equilibrio, muestra la dirección en que se produce la reacción, estudia los estados inicial y final.

Estos procesos de interacción agua-roca son estudiados en el laboratorio, donde se simulan los que ocurren en la naturaleza, por acción de las aguas subterráneas, mediante los cuales estas adquieren sus componentes químicos, **P. Newbrough y C. Gammons (2002)**. Los estudios "in situ" de estos procesos, han permitido conocer el modo en que las aguas adquieren los constituyentes específicos durante los procesos de intemperismo y de mezcla de aguas someras con otras más profundas que poseen una mayor concentración de un ion determinado. Coinciden con estos criterios, **N. Goldscheider (2003) et al;** **J. E. Moran y T. P. Rose (2003);** **X. Wen y Y. Zhang (2004);** **S. Ettazarini (2004)**.

Para describir la cinética de las aguas subterráneas naturales son fundamentales las leyes de velocidad y reacción química, las cuales consideran que una reacción simple es aquella, en la cual el compuesto A se transforma a B, y puede ser seguida a través de la variación de la concentración del compuesto A en el tiempo.  $A \rightarrow B$ ,

por lo que  $V = -\frac{dC(A)}{dt}$ , expresión que define la velocidad de la reacción (v), como la

variación de la concentración de A en el tiempo (t). Las unidades de la velocidad dependen del tipo de reacción química y pueden expresarse en  $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

La forma en que la velocidad de reacción varía con la concentración de una de las especies reaccionantes dada, se denomina orden de reacción respecto a dicha especie. Si  $V = (A)^\alpha (B)^\beta (C)^\delta$ , entonces  $n = \alpha + \beta + \delta$ . En este caso la reacción será de orden  $\alpha$  con respecto a la especie A, de orden  $\beta$  con respecto a la especie B y de orden  $\delta$  con respecto a la especie C, y el orden total de la reacción será n. El coeficiente  $k$  es la constante de velocidad, también conocida como velocidad específica y es igual a la velocidad de la reacción (V) cuando las concentraciones de todas las especies se igualan a la unidad. **P. González (2003)**. Para una reacción sencilla de orden n, las unidades serán  $\text{mol}^{1-n} \text{L}^{n-1} \text{s}^{-1}$ .

Para  $n=0$ , la velocidad es independiente de la concentración de los reaccionantes y se expresa:  $V = -\frac{dC(A)}{dt} = K$ . Para  $n=1$ , la velocidad es directamente proporcional a

la concentración de los reaccionantes:  $V = -\frac{dC(A)}{dt} = K \cdot C(A)$  ó

$\log V = \log K + \log C(A)$ . Si  $n=2$ , la velocidad es directamente proporcional al cuadrado

de la concentración de los reaccionantes:  $V = \frac{dC(A)}{dt} = K \cdot C(A)^2$  ó

$\log V = \log K + 2\log C(A)$ .

La velocidad de las reacciones aumenta exponencialmente con la temperatura como lo describe la ecuación de Arrhenius:  $K(T) = A_0 e^{-E_a / RT}$ , donde  $A_0$ : factor pre-exponencial,  $E_a$ : energía de activación (valores entre 8 y 20 kJ/mol para procesos controlados por el transporte y entre 40 y 100 kJ/mol, para procesos controlados por reacción química),  $R$ : constante de las gases y  $T$ : temperatura expresada en Kelvin.

En los años recientes es que se ha aplicado la cinética de disolución de los minerales al estudio de las aguas subterráneas, para ello, se han realizado numerosos estudios tanto a nivel de laboratorio como en el campo; **R. Curl, 1965; R. A. Berne y J. W. Morse, 1975; E. L. Sjöberg y D. T. Rickard 1985; Herman, et. al, 1986; R. G. Comton y P. R. Unwin, 1990; J. R. Fagundo et. al, 1992; P. González, 1997; V. Monteagudo et al (2007c)**, los que llegaron a diferentes expresiones para representar la variación de las concentraciones de las especies disueltas con el

tiempo.  $\frac{dc(C_i)}{dt} = \frac{A}{V} \cdot \frac{e_i}{V_m} \cdot \frac{dr}{dt}$

En la cual  $C_i$  es la concentración del ion (mol/L),  $V$  es el volumen de la disolución (L),  $e_i$  un factor estequiométrico,  $A$  es el área de la superficie del cristal a un tiempo  $t$  ( $m^2$ ),  $r$  es el radio del cristal (m) y  $V_m$  es el volumen molar del cristal ( $m^3$ ).

Durante la disolución de los minerales la velocidad está influenciada por la cantidad de cristales presentes, su variación durante el proceso y la composición de la solución. Para introducir estos parámetros en la ecuación de velocidad se puede formular según **Christoffersen (1979)**, como sigue:

$$V = \left| \frac{dn_{Cr}}{dt} \right| = Km_0 F\left(\frac{m}{m_0}\right) g(C)$$
, donde V es velocidad total de reacción, K constante de velocidad,  $m_0$  la masa inicial del cristal cuando empieza el experimento, m la masa del cristal a un tiempo t,  $F\left(\frac{m}{m_0}\right)$  es el término que representa la morfología del cristal, su tamaño y la variación durante la reacción y  $g(C)$  representa la influencia de la composición de la solución en la velocidad.

### 1.9 Patrones hidrogeoquímicos y relaciones matemáticas

A pesar de que las aguas naturales adquieren su composición química mediante un proceso complejo donde intervienen diferentes factores, en un sitio determinado o área con cierta homogeneidad; la composición relativa varía poco, fundamentalmente en las aguas minerales, que en todo momento mantienen un tipo hidroquímico y poseen, por lo general, un mismo patrón.

El método de los patrones hidrogeoquímicos es una herramienta importante para el análisis de los tipos de aguas presentes en un sistema natural, sus posibles cambios y sus orígenes. El método propuesto por **J. R. Fagundo (1998)**, es de gran utilidad en la interpretación de los procesos geoquímicos y en el control de la calidad de las aguas, en el cual la composición química es expresada en términos de tanto por diez, se divide por diez la concentración expresada en por ciento de meq/L y el resultado se redondea a números enteros entre 1 y 8.

Cada patrón se expresa mediante un juego de seis números enteros; tres para los aniones y tres para los cationes, ordenados según la secuencia:  $Na^+ + K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+} : Cl^- : HCO_3^- : SO_4^{2-}$ , de esta forma se crean hasta  $27 \times 27 = 729$  combinaciones numéricas o patrones hidrogeoquímicos.

La representación gráfica de estos patrones se realiza mediante diagramas de Stiff, **J. R. Fagundo (1990; 1996)**, que consiste en tres ejes de coordenadas paralelos, con origen en el centro y divididos en diez unidades; sobre los ejes se sitúan los seis puntos correspondientes a las concentración de cada ion, los cationes a la izquierda

y los aniones a la derecha, y se unen los puntos mediante rectas. El análisis de estos patrones permite establecer relaciones entre aguas de diferentes muestras e inferir cualitativamente los procesos geoquímicos que ocurren.

Las aguas naturales se clasifican según su composición química. Para nombrarlas se tienen en cuenta los componentes que sobrepasen el 20 % (tanto por diez = 2) y en orden decreciente de la concentración iónica, nombrando primero los aniones y luego los cationes. La clasificación del tipo de agua se hace siguiendo el método de Kurlov en **J. R. Fagundo (1996)**. Diferentes patrones pueden corresponder a un mismo tipo de agua, por lo que existen 227 tipos en total, como se muestran en la **tabla 1.1**.

**Tabla 1.1. Patrones hidrogeoquímicos.**

Cationes	Relaciones estequiométricas			Aniones
$\text{Ca}^{2+}$		1:8:1		$\text{HCO}_3^-$
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$		8:1:1		$\text{Cl}^-$
$\text{Mg}^{2+}$		1:1:8		$\text{SO}_4^{2-}$
$\text{Ca}^{2+} > (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	2:7:1	3:6:1	4:1:5	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$
$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	1:7:2	1:6:3	1:5:4	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$
$(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+}$	7:2:1	6:3:1	5:4:1	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$
$(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+}$	7:1:2	6:1:3	5:1:4	$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$
$\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$	1:2:7	1:3:6	1:4:5	$\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$
$\text{Mg}^{2+} > (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$	2:1:7	3:1:6	4:1:5	$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$
$\text{Ca}^{2+} > (\text{Na}^+ + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+}$		3:5:2		$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$
$\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$		2:5:3		$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^-$
$(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$		5:3:2		$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$
$(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$		5:2:3		$\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$
$\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > (\text{Na}^+ + \text{K}^+)$		2:3:5		$\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^-$
$\text{Mg}^{2+} > (\text{Na}^+ + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+}$		3:2:5		$\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$

### **1.10 Evaluación crítica de los modelos químico-físico, hidrogeoquímico y estadístico**

El uso de los sistemas automatizados ofrecen ventajas en la caracterización hidrogeoquímica de cuencas y redes de control de la calidad; permiten evaluar los diferentes tipos de agua, su variación estacional en diferentes intervalos de tiempo y su grado de agresividad y saturación respecto a los minerales constituyentes de las rocas por donde se mueven dichas aguas; favorecen la realización de estudios sobre los procesos cinéticos de interacción agua-roca a escala de laboratorio, con el propósito de simular procesos naturales en cuencas subterráneas o redes hidrológicas. Los sistemas automatizados constituyen una herramienta muy útil en el estudio de la calidad de las aguas, son novedosos y eficientes, se fundamentan en principios químico-físicos e hidrogeológicos.

Basados en modelos de tipo químico-físico e hidrogeoquímico se han implementado numerosos sistemas informáticos (**J.R. Fagundo y P. González, en: J.R. Fagundo, 2007c**), siendo los más comúnmente utilizados:

**WATE4F (J. W. Ball y D. K Nordstrom, 1991)**, **PHREEQC (D.L. Parkhurst (1997); D.L. Parkhurst y C.A.J. Appelo, 1999)**, **SOLMNEQ**, Kharaka et al (1998), entre otros; mediante un modelos de especiación química determinan el grado de saturación del agua. Como limitación para el uso de estos sistemas se plantea, que si los datos no representan las condiciones originales del agua subterránea a estudiar, los resultados que rendirá el modelo no serán confiables para utilizarlos en interpretaciones geoquímicas.

**BALANCE (D. L. Parkhurst et al, 1982)** y **NETPATH (L. N. Plummer et al, 1991)**, determinan la masa de minerales disueltos y/o precipitados a lo largo de un camino de flujo y considera también reacciones de intercambio iónico y mezcla de aguas. La interpretación de los resultados puede dar como resultado varios modelos posibles y el usuario decide el más adecuado.

En Cuba se han implementado un grupo de software, en unos casos basados en principios similares a los anteriormente mencionados (**HIDROGEOQUIM, J. R. Fagundo et al, 2005**; **MODELAGUA, (J. Fagundo Sierra et al, 2001)** y otros que no

tienen similitud con ellos (SAMA, **E. Álvarez et al, 1990**; BATOMET, **I. Vinardell et al, 1991**; SACAN, **G. Tillán et al, 1996**; SIMUCIN, **E. Álvarez y J. R. Fagundo, 1996**). Estos sistemas informáticos, al igual que los de tipo comercial, requieren del empleo de datos hidroquímicos confiables y del conocimiento básico por parte de los especialistas de las características geológicas e hidrogeológicas del medio drenado.

Con el empleo de estos sistemas informáticos en el país, junto con la elaboración de metodologías específicas de trabajo (**P. González et al, 1999**; **J. R. Fagundo et al, 2006a**; **2006b**; **Suárez et al, 2007**), se han desarrollado investigaciones novedosas en el campo de la hidrogeoquímica, la hidrogeología y el medio ambiente, elaboradas en el marco de tesis de Maestría (**P. González; 1997**; **V. Ferrera, 1997**; **S. Jiménez, 1999**; **L. Sánchez, 2000**; **M. Llerena, 2000**; **B. Peña, 2001**, **M. Hernández, 2002**; **T. Leonarte; 2003**; **M. Rodríguez (2005)**; **O. Beato, 2008**) y Doctorados (**E. Álvarez; P. González**).

En esta tesis, se hacen contribuciones adicionales a dichas metodologías, que son aplicadas en la caracterización hidrogeoquímica de las principales fuentes de abasto de Las Tunas, ya que los patrones hidrogeoquímicos de las aguas de esta provincia no reflejan los procesos de interacción agua-roca que se establecen en los procesos de intemperismo, debido a la alta salinidad del agua, se crearon nuevos patrones excluyendo el cloruro de sodio. De ese modo se obtuvieron patrones hidrogeoquímico que si guardaban relación con la geología drenada. También se utilizaron experimentos de lavado de suelo y se simularon en el laboratorio procesos de interacción agua-roca para esclarecer el modo en que el agua subterránea adquiere su composición química en ese territorio.

### **1.11 Marco geográfico, geológico e hidrogeológico de la provincia Las Tunas**

El área de estudio, con una extensión de 6 587 km<sup>2</sup>, incluyendo 4,9 km<sup>2</sup> de cayos adyacentes, es una franja que se extiende desde la costa norte, limitada por el Océano Atlántico, hasta la costa sur, limitada por el Golfo del Güacanayabo (Mar Caribe) y la provincia Granma. Al este limita con la provincia de Holguín y al oeste

con la de Camagüey. En la **figura 1.1**, se ubica la ciudad capital de la provincia y los ocho municipios que la componen. **J. C. Pérez (2003)**.

El clima que predomina en Las Tunas es tropical de sabana. Las temperaturas máximas promedio registradas son 27,4 °C y las mínimas promedio de 23,4 °C, las que se ajustan a lo expresado en el nuevo Atlas Nacional de Cuba en cuanto al régimen anual de 24 °C en las llanuras. El promedio anual de la evaporación potencial oscila entre 2 379 y más de 2 780 mm, el que se ubica entre los más altos del país. La humedad relativa alcanza valores mensuales que oscilan entre 74% en marzo y abril y el 83% de septiembre a noviembre. Predominan los vientos del tipo Palmarito de Cauto, con alisios y calmas, que los promedios oscilan entre 7,7 y 13,7 Km/h. **H. Feria (2004)**.

Las precipitaciones atmosféricas experimentan mayores cambios en el tiempo y el espacio, las causas principales están en la influencia de la circulación atmosférica, el carácter de la superficie terrestre y las aguas marinas. El promedio mensual expresa una marcada diferencia entre los períodos lluvioso y seco. Los valores máximos se observan en mayo con 180 mm y mínimos en junio con 100 mm. Los meses más secos son diciembre y enero, que no superan los 20 mm.

Se aprecia que el promedio anual de evaporación en la provincia es elevado, superior a los valores de precipitaciones registradas en el período de la investigación, lo que se debe a la combinación de tres factores: una elevada radiación solar (16,5 y más de 17 MJ/m<sup>2</sup>), la velocidad del viento (entre 10,2 y 11 km/h) y la humedad relativa oscila entre 90 y más del 95%, siendo una de las más altas del país, lo que se manifiesta en los escasos valores de precipitación media anual que se producen en la provincia. **Atlas Nacional de Cuba (1988)**.

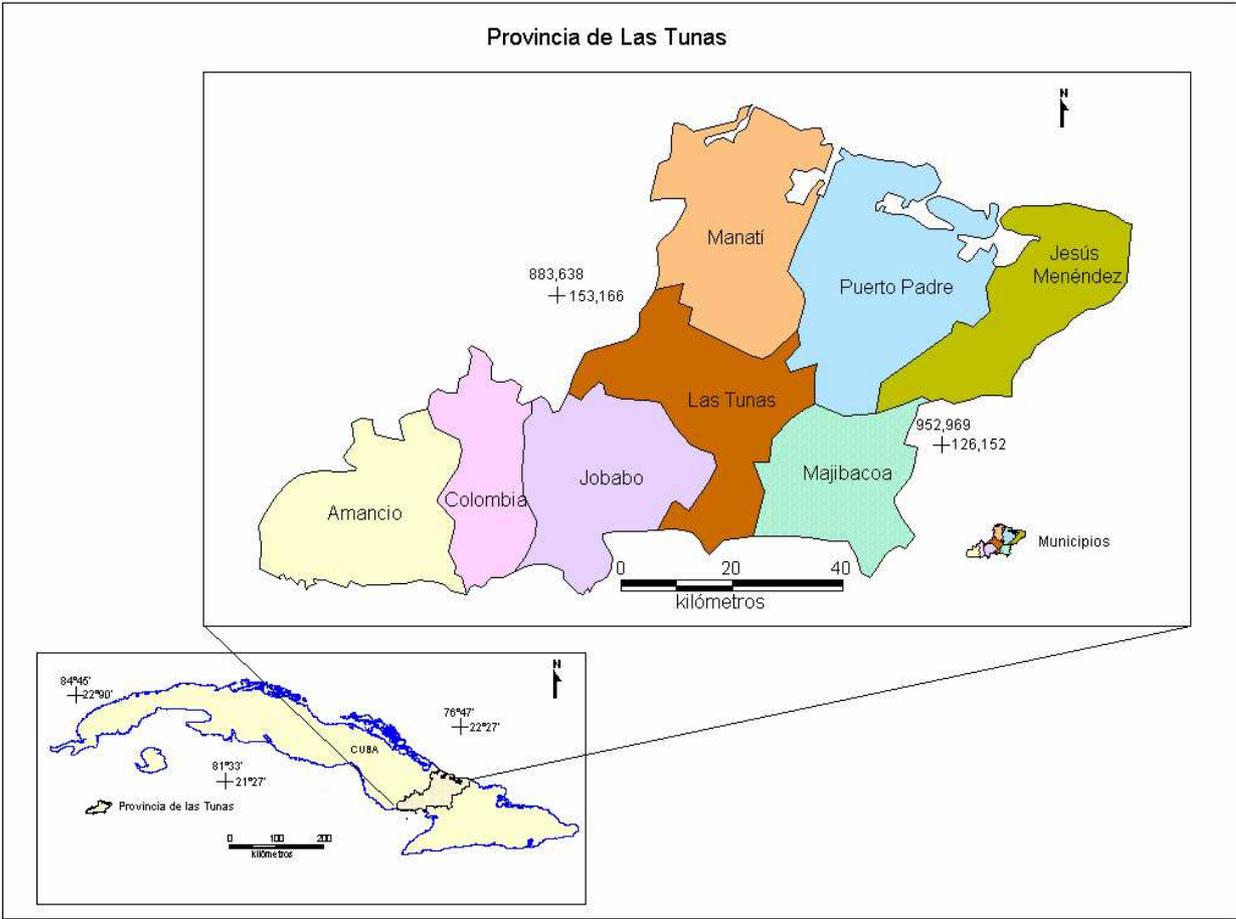


Figura 1.1. Ubicación geográfica de la provincia de Las Tunas.

Los estudios realizados por **C. de Miguel (1994; 2003); E. Vázquez y R. Rodríguez (2000-2005)**, permitieron analizar las características geológicas de la provincia Las Tunas a partir de un conjunto complejo de formaciones, distribuidas a lo largo y ancho de la localidad. En la **figura 1.2**, se observa una notable simetría que parte de un eje central, y coincide con el parte aguas en la porción más elevada del perfil norte-sur, con una pendiente suave hacia ambas costas dando la impresión de una figura convexa.

Esta zona central es la más antigua (Cretácico. K), con un complejo de rocas ígneas intrusivas y efusivas, en el que se manifiesta la presencia de un gran número de fallas y estratos plegados, testigos de un intenso tectonismo. Al norte y sur de este complejo del Cretácico, se localizan formaciones más jóvenes (Neógeno-Paleógeno N-P) y en las franjas costeras se encuentran los complejos más recientes (Cuaternario).

Para describir las formaciones geológicas identificadas en Las Tunas se siguen los criterios de **C. de Miguel (1994; 2003); E. Vázquez y R. Rodríguez (2000; 2005)**, los que fueron empleados por **J. C. Pérez Yero (2003)**, durante la caracterización de los suelos del sector Tunas Norte y que sirvieron como referente teórico para la interpretación de los resultados obtenidos en esta investigación, para explicar la forma en que las aguas adquieren su composición química por influencia de los suelos salinos.

En la tabla 2.1 se presentan las formaciones geológicas, edad, símbolo, composición litológica, cuenca donde se encuentran los puntos de muestreo seleccionados y la profundidad de los pozos, para facilitar la comprensión de los experimentos y la discusión de los resultados.

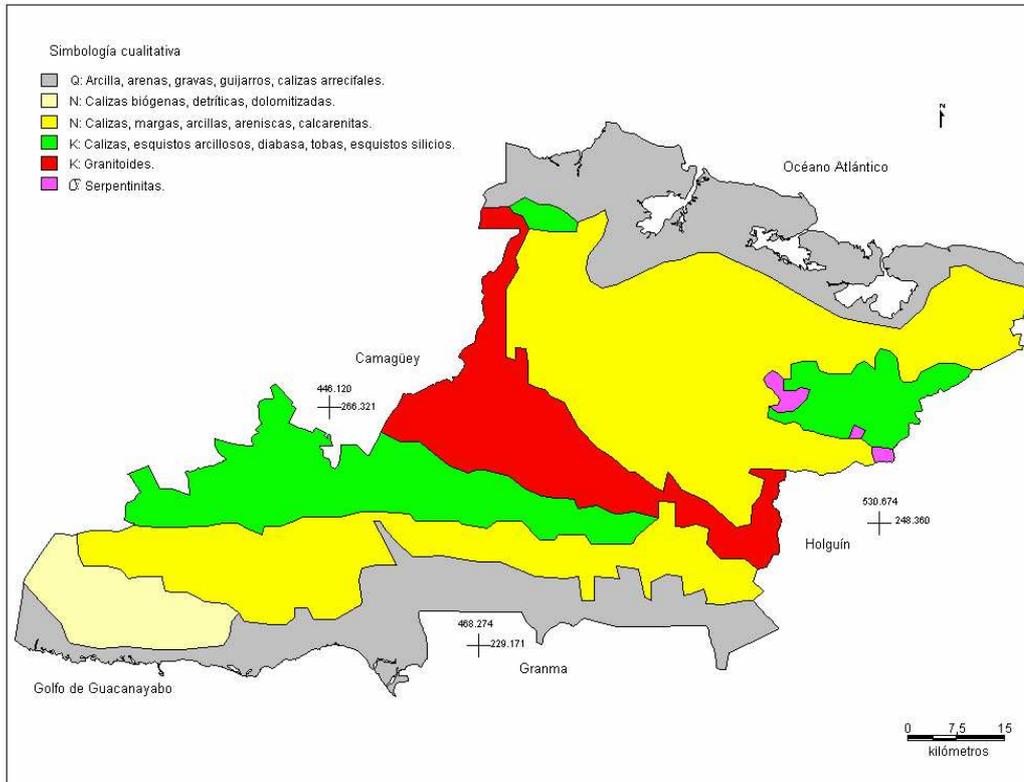


Figura 1.2. Geología de la provincia de Las Tunas (Cortesía de Enrique Vázquez Fernández).

En **figura 1.3**, se representan las tres estructuras hidrogeológicas existentes en Las Tunas: la cuenca Tunas Norte, la cuenca Sur de Las Tunas y el Macizo Hidrogeológico Central. El Macizo Hidrogeológico del Cretácico ocupa la porción central de la provincia y un sector en el extremo norte, que limita con la provincia de Holguín, formado por rocas de edad Cretácico, que se encuentran muy plegadas y agrietadas por la acción de los fenómenos tectónicos, que han afectado a la localidad en su evolución. Coinciden con este criterio **C. de Miguel (2000)**; **E. Vázquez y R. Rodríguez (2005)**.

Las rocas son poco permeables y por lo general, las aguas subterráneas proceden de la infiltración de las precipitaciones atmosféricas que ocurren en la región. Como se muestra en la **figura 1.3**, la dirección del flujo se presenta en varias direcciones, debido a los desniveles del terreno y a las condiciones topográficas. Predomina el flujo desde el parte agua central hacia la porción sur y norte. La cuenca subterránea Sur de Las Tunas; está compuesta por rocas del Mioceno y sedimentos del Cuaternario; los principales acuíferos se desarrollan en las formaciones geológicas Arroyo Palma, Güines y Yayal, constituidas por rocas de elevada permeabilidad. La dirección y movimiento del flujo subterráneo es de Norte a Sur, excepto en zonas donde se localizan los pozos de explotación, donde las líneas del flujo toman una dirección en forma de embudo, **figura 1.3**.

La Cuenca subterránea Tunas Norte está formada por sedimentos del Cuaternario y rocas del Neógeno que yacen concordantemente sobre las de edad Cretácica. Los principales acuíferos se desarrollan en la formación geológica Vázquez, que almacenan considerables volúmenes de agua subterránea (cuenca La Cana). La dirección del flujo es desde el Sur Sudoeste hacia el Norte, **figura 1.3**.

En la **tabla 1.2 (Anexo I)** se presenta de forma resumida el potencial hídrico subterráneo de la provincia Las Tunas. Se aprecia que la cuenca subterránea que abarca la mayor extensión (774, 25 Km<sup>2</sup>), y el mayor volumen de agua almacenada (361,60.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) es Sevilla, seguida de Birama y Colombia; todas ubicadas al sur de la provincia. Se destaca por su importancia como fuente de abasto principal de la

ciudad de Las Tunas, la cuenca La Cana, que es un yacimiento de agua natural dentro de una cuenca artesiana de grandes dimensiones, situada al norte de la provincia: la cuenca Tunas Norte, con un área de 77,92 km<sup>2</sup> y un volumen de agua almacenada de 26,87.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>.

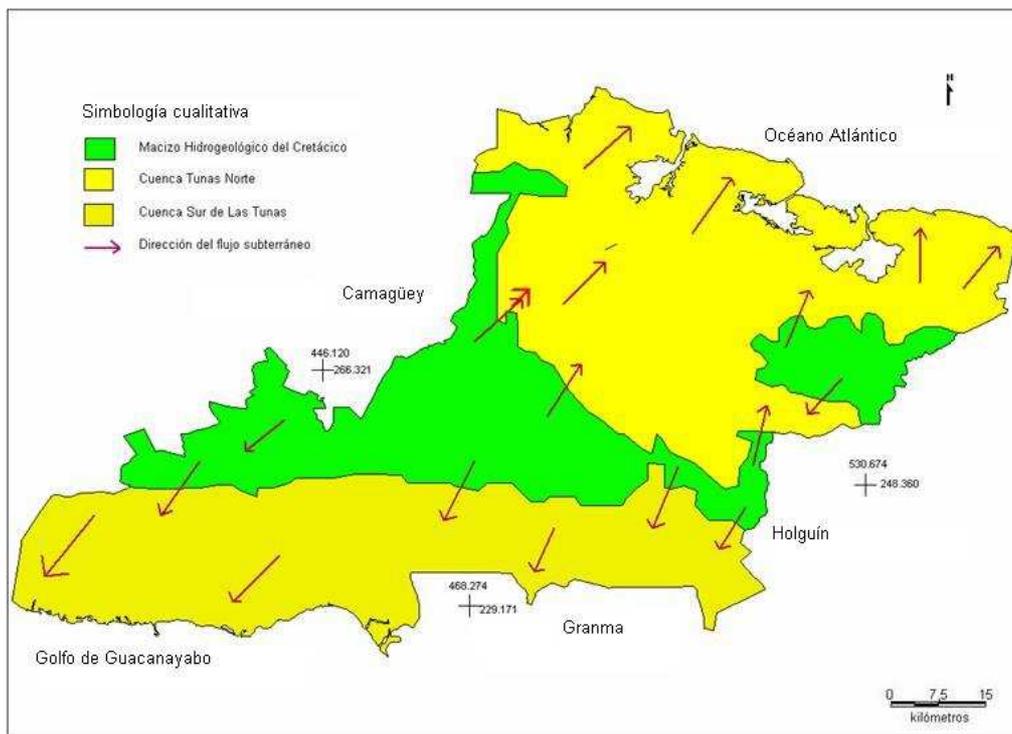


Figura 1.3. Estructura hidrogeológica de Las Tunas (Cortesía de Enrique Vázquez Fernández).

## **CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS**

En este capítulo se presenta la metodología utilizada en la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas y superficiales de la provincia Las Tunas, basada en el uso de programas informáticos, para evaluar los datos obtenidos por métodos convencionales en los laboratorios de control de la calidad de las aguas. Se reflejan de forma resumida las técnicas analíticas utilizadas y el modo en que fueron empleados los modelos químico-físico, hidrogeoquímico y estadístico.

### **2.1 Caracterización de la muestra**

La primera fase del trabajo comprendió un estudio bibliográfico y la realización de visitas de reconocimiento en el área objeto de estudio, donde se tomaron muestras con fines de orientación. La segunda fase del trabajo consistió en la selección de los puntos de muestreo; 30 fuentes representativas de las formaciones geológicas y de la composición litológica presente en Las Tunas; dos presas y 28 pozos.

Para su selección se consideraron los tres sectores hidrogeológicos: Cuenca Tunas Norte, Macizo Hidrogeológico del Cretácico y Cuenca Sur de Las Tunas, así como todos los municipios de la provincia. En la selección se tuvo en cuenta la información geológica, hidrogeológica e hidroquímica de las fuentes de agua, se consultaron los trabajos realizados por diferentes especialistas, informes de archivo y el mapa geológico de Cuba a escala 1:250 000 (**IGP-ACC. 1989**).

En la **tabla 2.1 a, b, c**, se muestra la caracterización de los puntos de muestreo seleccionados, los que se agruparon por formación geológica, edad de las rocas, tipo de rocas drenada por el agua de lluvia y cuenca donde se encuentra ubicada la fuente, según los criterios establecidos por **J. Tóth (1995)**. Como se observa en la **tabla 2.1 a, b, c**, el número de muestras tomadas en cada caso es diferente, lo que estuvo dado por las limitaciones materiales, de combustible, de transporte para llegar a los puntos de muestreo, así como a la falta de reactivos y equipamiento de laboratorio. En la **figura 2.1** se ilustra la ubicación de las fuentes de aguas subterráneas estudiadas en Las Tunas.

**Tabla 2.1 a. Caracterización de los puntos de muestreo. Sector hidrogeológico: Cuenca Tunas Norte**

No	Edad (Símbolo)	Formación Geológica	Composición Litológica	Cuenca	Puntos de Muestreo	Profundidad/m	Número de muestras (N)
1	Neógeno (N <sub>1</sub> <sup>1-2</sup> )	Vázquez	Margas, calizas y arcillas	Chaparra, Yarey-Maniabón, La Cana	P-12	25,00	30
					P.87	30,00	101
					P-104	32,00	143
					P-175	28,00	68
					P-El Cocal II	14,00	25
					P-19	20,00	48
2	Neógeno (N <sub>1</sub> <sup>2g</sup> )	Puerto Padre	Biocalcarenitas	Puerto Padre	P-Siete Aulas	27,00	13
					P-Reparto. Militar	21,00	9
					P-53	22,00	52
3	K <sub>2</sub> m	Caobilla	Vulcanitas medio-ácidas, tobas, tufitas	Puerto Padre-Manatí	P-Acto. Manatí	12,00	24
					P-105	27,00	34

**Tabla 2.1 b. Caracterización de los puntos de muestreo. Sector hidrogeológico: Cuenca Sur de Las Tunas**

No	Edad (Símbolo)	Formación Geológica	Composición Litológica	Cuenca	Puntos de Muestreo	Profundidad/m	Número de muestras (N)
4	Neógeno (N <sub>1</sub> <sup>3</sup> - N <sub>2</sub> )	Güines	Calizas biógenas, detríticas, dolomitizadas	Sevilla	P-Las Maboas	35,00	22
					P-292	45,00	12
5	Neógeno (N <sub>1</sub> <sup>2a</sup> )	Arroyo Palmas	Margas, calizas biógenas arcillosas, calizas arenosas	Sevilla, Colombia, Birama	P-Carretera Amancio	42,00	47
6	Neógeno (N <sub>1</sub> <sup>2a</sup> )	Yayal	Arcillas, calizas y margas	Birama	P-139	50,00	52

**Tabla 2.1 c. Caracterización de los puntos de muestreo. Sector hidrogeológico: Macizo hidrogeológico del Cretácico**

No	Edad (Símbolo)	Formación Geológica	Composición Litológica	Cuenca	Puntos de Muestreo	Profundidad/m
7	K <sub>2</sub> m	Jimaguayú	Calizas biógenas, margas, calcirruditas, areniscas	Puerto Padre	P-195	30,00
8	K <sub>2</sub> cp-m	Yáquimo	Margas, calizas, areniscas, rocas clásticas, tufitas, aleurolitas		P-45	25,00
3	K <sub>2</sub> m	Caobilla	Vulcanitas medio-ácidas, tobas, tufitas		P-32	20,00
9	K <sub>2</sub> cn-cp	Contramaestre	Areniscas tefroides, conglomerados, tobas, tufitas, aleurolitas, argilitas, calizas		Presa Rincón	-
					Presa Cayojo I	-
					Presa Cayojo II	-
					P-Central Jobabo	11,00
					P-Quinta Planta	18,00
					P-248	20,00
10	K <sub>1-2</sub> al-t	Guáimaro	Lavas y tobas basalto-andesíticas, andesito-basaltos, calizas		P-Edificio Parque	17,00
					P-La Siberia	18,00
					P-Alba Flores	16,00
					P-Circunscripción 7	12,00
					P-Cabecera Colombia	13,00
					P-MINAZ	15,00
11	K <sub>1-2</sub>	Iberia	Areniscas, diabasas, tobas, calizas y rocas clásticas		P-180	14,00

**CINTURÓN GRANODI ORÍTICO ASOCIACIÓN OFIOLITICA MESOZOICA**

12	K <sub>2</sub>		Cuerpo de granitos y sienitas		
13	K <sub>2</sub>		Plagiogranitas, granodioritas, tonalitas, dioritas cuarcíferas, granosienitas, sienitas, tonalitas, granitos		
14	σ		Serpentinatas, harzburguitas, lherzolitas, wherlitas, dunitas serpentizadas		

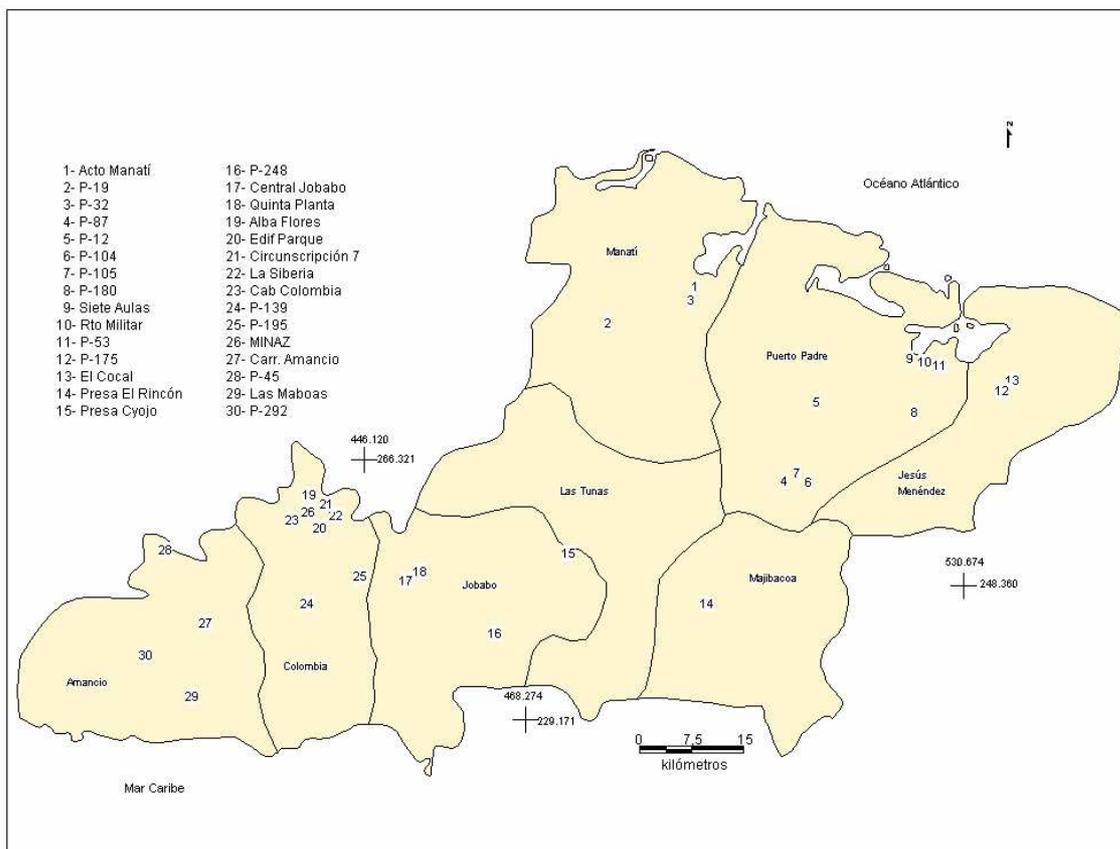


Figura 2.1. Ubicación de las diferentes fuentes de aguas naturales estudiadas en la provincia de Las Tunas.

## 2.2 Muestreo

Las muestras de agua subterráneas fueron tomadas dos veces al año, en período húmedo (Mayo-Octubre) y en período seco (Noviembre-Abril); mientras que en las aguas superficiales se tomaron con una frecuencia trimestral, lo que implicó la realización de 12 campañas de muestreo en los pozos seleccionados y 48 en las fuentes de agua superficiales; las muestras fueron tomadas a 50 cm de la superficie, para garantizar homogeneidad en la temperatura del agua (25°C).

Esta operación se ejecutó por los especialistas del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos en la provincia, según la **NC-93-02 (1985)**, que establece los requisitos sanitarios y el muestreo del agua potable. El volumen de muestra tomado por cada fuente, en cada campaña realizada fue de 2,5 L, para facilitar la realización de análisis completos.

## 2.3 Análisis químico

Las determinaciones químico-físicas de pH, temperatura y conductividad eléctrica se realizaron "in situ", mediante un potenciómetro (pHmetro manual de lectura digital marca Pocket-Sized chino), un medidor de temperatura y un conductímetro modelo HI-8424, marca HANNA, con su escala calibrada para leer directamente conductancias. Los resultados se expresan en unidades de pH a la temperatura de 25° C, con una precisión de  $\pm 0,05$  unidades.

Se utiliza la conductividad eléctrica, para estimar la cantidad de sales solubles totales (TSS) que tiene un agua, a través de un factor empírico que depende de los tipos de iones disueltos y de la temperatura del agua. Como la conductividad eléctrica de las disoluciones acuosas de sales aumenta con la temperatura, se toma como temperatura patrón la de 25 °C, que es la establecida en la **NC-93-02 (1985)** para lograr veracidad del resultado. Las unidades en que se expresa esta magnitud químico- física es el siemen por metro (S/m) y por lo general se brinda como milisiemen por metro, (mS/m) o microsiemen por centímetro ( $\mu\text{S/cm}$ ) a 25°C.

Como el instrumento utilizado es el conductímetro, se lee directamente la conductividad; se determina la constante de la celda a 25 °C y se calcula según la expresión:

$$K = \frac{1411,8 \cdot F}{L}$$

Donde:

1 411,8 es la conductividad específica de la solución de KCl 0,01 N a 25° C en micromhos/cm ó  $\mu\text{S/cm}$ .

F es el factor de conversión de la temperatura de la medida a 25°C.

L es la lectura obtenida en el instrumento con la solución de KCl 0,01 N.

La conductividad de la muestra en micromhos/cm a 25°C ( $\mu\text{mhos/cm}$  a 25°C ó  $\mu\text{S/cm}$ ), es:  $CE = L \cdot K \cdot F$

En la que L, K y F tienen idéntico significado que en la determinación de la constante de la celda a 25 °C.

Las muestras tomadas fueron conservadas y trasladadas al laboratorio provincial del Instituto de Recursos Hidráulicos, donde se realizaron los análisis químico-físicos correspondientes a las 967 muestras antes de las 24 horas de tomadas, que incluían las siguientes determinaciones,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , según la metodología establecida por "Standard Methods for the examination of wastewater. (APHA, AWWA, WPCP. (1989), adaptadas para condiciones de campo **Krawczyk (1992)**.

En el caso de los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ , se empleó la espectrofotometría de absorción atómica, con llama de aire-acetileno, a través de un espectrofotómetro de llamas de la firma PIE UNICAM. Las determinaciones ejecutadas y los métodos analíticos utilizados se resumen en la **tabla 2.2 (Anexo II)**. A cada una de las muestras se le determinaron las propiedades físicas: olor, color, sabor y turbidez. La repetición de las muestras se hizo por triplicado. Los resultados de los análisis se almacenan en

una base de datos denominada PRODAT, que fue formulada en Microsoft ACCESS por especialistas del INRH.

Los datos hidroquímicos utilizados corresponden a determinaciones analíticas realizadas por los laboratorios acreditados del INRH, según los métodos físicos y químicos estándares reportados en la literatura, **APHA-AWWA-WPCF (1992)**, por lo que se garantiza su confiabilidad. Antes de su procesamiento fue chequeada la calidad de los datos mediante la comparación entre la conductividad eléctrica real y la teórica, determinada mediante un algoritmo de cálculo implementado en el sistema informático HIDROGEOQUIM (**J.R. Fagundo et al, 2007**), por todo ello, se puede considerar que los métodos propuestos pueden ser representativos para la caracterización químico-física de los acuíferos estudiados en Las Tunas.

#### **2.4 Procesamiento de datos hidroquímicos con el uso de modelos químico-físico, hidrogeoquímico y estadístico**

Con el objetivo de evaluar la calidad de las aguas, han sido creados software específicos, basados en principios de la termodinámica y la cinética química integrados en modelos de reconocimientos de patrones, de balance de masas y mezclas de aguas, los que han sido utilizados en el procesamiento de los datos obtenidos por métodos convencionales durante la caracterización de las aguas subterráneas y superficiales, los cuales se describen a continuación:

**HIDROGEOQUIM:** es un sistema de procesamiento de datos hidroquímicos, implementado en Windows, con ficheros de datos similares o transformables entre sí a través del propio software, que permite obtener propiedades químico-físicas de las aguas y la variación temporal de diferentes variables. **J. R. Fagundo et al (2005)**. El sistema realiza la caracterización de aguas naturales, superficiales o subterráneas afectadas o no por la actividad del hombre o la intrusión salina.

Mediante este sistema de procesamiento de datos se expresan las concentraciones (Ci) en meq/L, mg/L, % meq/L), calcula la dureza, la mineralización y los principales estadígrafos del fichero, a partir de los valores de los parámetros químico-físicos. Establece relaciones iónicas de interés geoquímico y los índices de agresividad de

las aguas sobre la base de los modelos de Tillman-Trombe (pH, pH de saturación y CO<sub>2</sub> en equilibrio) y de W. **Back et al (1966)**. (RSC, RSD, RSY y CO<sub>2</sub> en equilibrio).

Este sistema realiza la representación gráfica de la dureza, la temperatura, el pH, el CO<sub>2</sub>, la conductividad eléctrica (CE), la mineralización (TSS), el CaCO<sub>3</sub>, la relación de saturación de la calcita (RSC), de la dolomita (RSD), la del yeso (RSY) y la fuerza iónica en función del tiempo. Para evaluar la capacidad de disolución de los carbonatos por las aguas subterráneas y superficiales se utilizan los índices de saturación. Estos fueron definidos por **W. Back (1966)** y para el caso de la calcita, la dolomita y el yeso pueden expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$RSC = \log \frac{(Ca^{2+})(CO_3^{2-})}{KC}$$

$$RSD = \log \frac{(Ca^{2+})(Mg^{2+})(CO_3^{2-})^2}{KD}$$

$$RSY = \log \frac{(Ca^{2+})(SO_4^{2-})}{KY}$$

En las que RSC, RSD, RSY, representan la relación de saturación de la calcita, la dolomita y el yeso respectivamente, mientras que KC, *KD* y *KY* son constantes del producto de solubilidad de estos minerales. De forma general estos índices se expresan mediante la ecuación:  $SI = \log \frac{KIAP}{Keq}$

En la cual SI es el índice de solubilidad.

$K_{IAP}$  es el producto de la actividad iónica.

$Keq$  es la constante de equilibrio termodinámica del mineral.

**MODELAGUA:** es un programa desarrollado en BORLAND DELPHI 4 sobre Windows, **J. Fagundo Sierra et al (2001)**. Realiza cálculos para la caracterización de las aguas naturales., compara la composición química de una muestra con una o dos muestras de referencia, para identificar los procesos químicos que originan su composición, mediante el cálculo de balance de masas y análisis de mezcla. Realiza

gráficos de Stiff para la clasificación y determinación del tipo de agua (**H. A. Stiff**). En este programa se emplean modelos de los más utilizados para el estudio y caracterización de las aguas naturales: el de reconocimiento de patrones hidrogeoquímicos, el de balance de masa y el de análisis de mezcla.

El cálculo de balance de masa es de gran utilidad para identificar reacciones que explican las diferencias en la química de las aguas a lo largo de su trayectoria, para reacciones de intemperismo de los silicatos, de carbonatos y reacciones de oxidación-reducción. No obstante, el modelo tiene limitaciones, ya que las soluciones de las ecuaciones de balance de masa no son necesariamente únicas; diferentes conjuntos de reacciones pueden corresponder satisfactoriamente a un mismo juego de datos, no existen restricciones químico-físicas y los cálculos pueden predecir reacciones imposibles.

Debido a las limitaciones para efectuar correctamente el balance de masa, es necesario analizar la litología del acuífero estudiado. Se seleccionan las reacciones que son lógicas desde el punto de vista geoquímico y se revisa la validez de los resultados con criterios químico-físicos, a través de diagramas de estabilidad, constantes de equilibrio y constantes de velocidad. La solución aportada por el balance de masa no constituye una prueba de que las reacciones propuestas estén realmente ocurriendo. Sólo la integración de su resultado con el resto de la información le concede validez al mismo.

**SIMUCIN**: es un sistema automatizado para la simulación de los procesos cinéticos de disolución de los minerales y para la simulación matemática, (**E. Álvarez y J. R. Fagundo, 1996**). Realiza cálculos que requieren la cinética de los procesos de interacción agua-roca en condiciones de laboratorio y la simulación matemática de los mismos, relaciones matemáticas entre parámetros, valor de la constante de velocidad  $k$  y el exponente empírico  $n$ , la determinación de la concentración de los iones involucrados en la reacción cinética y la conductividad eléctrica al cabo del tiempo, según modelos teóricos.

Este sistema representa la evolución temporal de la composición química de las aguas, la variación de la constante de velocidad en el tiempo y los resultados de la simulación matemática de los experimentos cinéticos mediante diferentes opciones gráficas. Permite evaluar el papel del medio rocoso del acuífero en la calidad de las aguas. **J. R. Fagundo et al (2005)**.

En el procesamiento de datos hidroquímicos se emplearon los métodos de la estadística univariada en la determinación de estadígrafos de indicadores de tendencia central, media, valores máximos y mínimos, indicadores de dispersión como desviación estándar, varianza, coeficiente de variación y prueba de hipótesis; donde se emplearon los métodos más comunes de la estadística multivariada, el análisis de regresión y correlación y el análisis de series cronológicas, con la utilización del sistema informático **GEOQUÍM**, **tabla 3.1 a ,b ,c**.

El sistema **GEOQUÍM** para el procesamiento estadístico de datos, se utiliza para correlacionar los diferentes indicadores geoquímicos y de calidad de las aguas, **I. Vinardell et al (1991)**; calcula la matriz de correlación de todos los datos, la frecuencia de distribución, los principales estadígrafos de cada variable y las ecuaciones de correlación de cada pareja seleccionada.

El sistema establece relaciones recíprocas entre las variables que expresan las propiedades químico-físicas de las aguas (temperatura, pH, conductividad eléctrica, macro y microcomponentes, gases disueltos) y otros indicadores de calidad (turbiedad, color, oxígeno disuelto, demanda química de oxígeno y los componentes del ciclo del nitrógeno).

Este sistema determina la distribución de frecuencia de esas magnitudes y las ecuaciones de regresión correspondientes. El tratamiento estadístico realizado con este programa permite encontrar asociaciones entre variables para inferir un origen común y el efecto de los diferentes factores que determinan las propiedades químico-físicas y la calidad de las aguas.

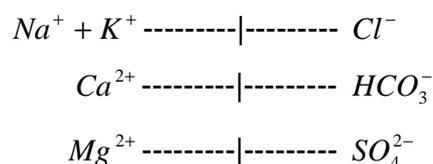
## 2.5 Clasificación de las aguas analizadas en Las Tunas

Las aguas subterráneas se clasifican según su composición química; para nombrarlas se tuvo en cuenta aquellos componentes cuya concentración es superior al 20 % (tanto por 10=2) y el orden decreciente de la concentración iónica, nombrando primero a los aniones y luego a los cationes. La clasificación del tipo de agua se realiza siguiendo el método de Kurlov, **en J. R. Fagundo (1996)**. En la **tablas 3.2 a, b, c** se observan los resultados obtenidos a partir de este procedimiento.

## 2.6 Representación de datos hidroquímicos

Las concentraciones de los constituyentes químicos presentes en las muestras analizadas, permitieron representar la composición química de las aguas identificadas en Las Tunas para facilitar su clasificación e interpretación. Entre los métodos gráficos más utilizados para representar los datos hidroquímicos se destacan los diagramas de **H. H. Stiff (1951)**.

Los diagramas de Stiff consisten en un sistema de tres ejes horizontales paralelos, con origen en el centro y divididos en diez unidades; sobre estos ejes se sitúan los seis puntos, en los ejes de la izquierda se ubican las concentraciones de los cationes  $Na^+ + K^+$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$ , de arriba hacia abajo, expresadas en meq/L y en el mismo orden, en los ejes de la derecha, los aniones  $Cl^-$ ,  $HCO_3^- + CO_3^{2-}$  y  $SO_4^{2-}$ , luego se unen los puntos mediante rectas, para obtener los patrones hidrogeoquímicos correspondientes, como se muestra a continuación :



Este método permite apreciar y comparar de forma rápida, los diferentes tipos de aguas cuando sus constituyentes se encuentran en cantidades limitadas y es muy útil para analizar cambios en el comportamiento de un agua subterránea en el tiempo, por influencia de factores climáticos, hidrogeológicos o efectos antrópicos. Se

utilizan en la representación gráfica de la composición química de las aguas naturales con la aplicación del programa de computación MODELAGUA, que se explica en el capítulo I epígrafe 1.10 como modelo hidrogeoquímico.

Del análisis de estos patrones se pueden inferir cualitativamente los procesos geoquímicos presentes en una región determinada, (disolución de halita, disolución-precipitación de calcita, disolución-precipitación de dolomita, intemperismo de plagioclasas, intemperismo de serpentinita, oxidación de pirita, entre otros, que determinan el origen de la composición química del agua.

### **2.7 Determinación de patrones hidrogeoquímicos**

El programa MODELAGUA emplea uno de los modelos más utilizados en el estudio y caracterización de las aguas subterráneas, el de reconocimiento de patrones, que permite expresar y representar los datos hidroquímicos mediante patrones hidrogeoquímicos. Es utilizado en esta tesis para expresar la relación existente entre la composición química de las aguas analizadas en Las Tunas y el medio drenado. Estos patrones son formulados a partir del tanto por diez de la concentración aniónica y catiónica expresada en meq/L.

### **2.8 Determinación del origen de la composición química del agua**

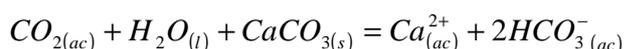
Para la determinación de los procesos geoquímicos que originan la composición química de las aguas subterráneas analizadas, se utilizó el programa de computación MODELAGUA. Se diseñó un algoritmo complementario para determinar la composición de las plagioclasas.

### **2.9. Metodología para la simulación de los procesos de interacción agua-roca carbonatada**

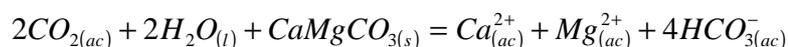
Con el objetivo de estudiar la cinética de disolución de las rocas carbonatadas a nivel de laboratorio, se realizaron experimentos en condiciones de sistema cerrado respecto al CO<sub>2</sub>, en un reactor tipo bacht, con una capacidad de tres litros y medios, cubierto con una tapa y provisto de un agitador, los electrodos de temperatura, pH, conductividad eléctrica y un tubo dispersor del CO<sub>2</sub>, el cual se suministra desde un balón conectado a un manómetro.

Se realizaron dos tipos de experimentos: los denominados del tipo REL (se sigue la reacción a través de toma de muestras para las determinaciones físico-químicas) y los denominados del tipo CINET (la reacción es seguida a través de las mediciones directas de los parámetros químico- físico, **J. R. Fagundo (1996)**).

Las rocas utilizadas en los experimentos fueron una caliza, de la Fm. Vázquez (constituida fundamentalmente por el mineral calcita) y una dolomía de la Fm. Güines (compuesta principalmente por dolomita), ambas del Mioceno, tamizadas (80 y 200 mesh) y caracterizadas por difracción de rayos X. El CO<sub>2</sub> utilizado en todos los experimentos, es de un 99,99 % de pureza envasado en cilindro a una presión de 150 atm. Las reacciones químicas que tienen lugar en estos procesos son las siguientes:



Calcita



Dolomita

Utilizando el sistema **SIMUCIN**, se determinaron las constantes cinéticas de cada reacción a partir de los datos obtenidos y las relaciones matemáticas encontradas en el experimento REL. El contenido de CO<sub>2</sub> se determinó a partir de los valores de pH, temperatura y concentración de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, con la utilización del algoritmo implementado en el sistema; se calcularon las constantes de velocidad, el orden de reacción y las expresiones correspondientes para la simulación en el laboratorio de estos procesos.

## **2.10. Metodología para el desarrollo de experimentos de lavado de suelos**

Los experimentos de lavado de suelo no fueron concebidos inicialmente en los objetivos de la tesis. Una vez obtenidos los resultados de la caracterización de las aguas subterráneas en Las Tunas, se pudo constatar que, de manera general, el total de sólidos solubles era elevado al igual que las concentraciones del anión cloruro y del catión sodio, lo que no estaba presumiblemente en correspondencia con la litología drenada por las aguas (principalmente calizas y margas), por lo que fue

necesario desarrollar experimentos de lavados de suelo, que permitieran explicar este comportamiento.

Se tomaron muestras representativas del perfil del suelo, de los horizontes A, B y C, en todos los municipios de la provincia, teniendo en consideración la ubicación de las fuentes de agua analizadas, donde el TSS y el cloruro de sodio, era superior a lo establecido en la NC-93-02/1985. Las muestras fueron tomadas por los especialistas del departamento de suelos del Ministerio de la Agricultura en la provincia, según las recomendaciones que aparecen en la Norma Ramal de la Agricultura, **(NRAG-889)**, vigente desde 1998.

La **NRAG-889** de 1998, establece los análisis químicos de suelos, la determinación del total de sólidos solubles y los aniones y cationes solubles en el extracto acuoso en una relación 1:5 suelo-agua. Para dar cumplimiento a lo establecido en esta norma se tomaron 100 g de suelo en cada uno de los sitios seleccionados, que contempló horizontes A, B, C; las muestras fueron sometidas a un proceso de secado en el área de preparación, a temperatura y presión normal, para eliminar la humedad contenida en ellas.

Una vez extraída toda la humedad, la muestra se muele con el propósito de aumentar la superficie de contacto y facilitar el proceso de disolución de las sales contenidas en ella; se tamiza con un tamiz de 0,25 mm. Finalmente, se le añade a la muestra agua destilada hasta alcanzar un volumen de 500 mL de solución, para mantener la proporción 1:5 suelo-agua; se agita y se deja en reposo durante 24 horas, luego se filtra; el agua que resulta del lavado de suelo se recoge y es utilizada para realizar los análisis químicos según se establece en la **NC-93-11 (1986)**, que establece los requisitos para las aguas de riego.

A cada una de las muestra se le determinó  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+ + K^+$ ,  $CO_3^{2-}$ , según la metodología establecida por "Standard Methods for the examination of wastewater. **(APHA, AWWA, WPCP. (1989))**. Los análisis fueron realizados por especialistas del laboratorio provincial de suelo, lo que garantiza la confiabilidad de los resultados alcanzados.

### **2.11. Metodología para el cálculo de las plagioclasas mediante modelación hidrogeoquímica**

Para la determinación del tipo de plagioclasa se tomó en consideración el contenido de sodio y calcio en una muestra de agua cuya composición química sólo se deba a su interacción con las plagioclasas, esto es, que el sodio y el calcio se originen por el intemperismo de los minerales de tipo aluminosilicatos y no al intercambio  $\text{Na}^+$ - $\text{Ca}^{2+}$  o la interacción con calcita. De ese modo se tomaron en cuenta aquellas muestras cuya composición estaba relacionada con tobas, esquistos, y otras rocas no portadoras de calcita. De esta forma la relación entre el sodio y el calcio en dichas muestras solo podría atribuirse al intemperismo de albita y anortita (minerales constitutivos de las plagioclasas). Los cálculos se realizan de acuerdo a la relación albita-anortita de una plagioclasa, (**Tablas 3.6 y 3.10**).

### **2.12 Confección de mapas y esquemas**

Los mapas que se presentan en la tesis fueron digitalizados con ayuda del programa MAPINFO (1996), los que ofrecen una valiosa información sobre las relaciones existentes entre la química de las aguas y las condiciones geológicas y físico-geográficas, cuando se superponen en él la litología presente en una región determinada y los diagramas de Stiff con la composición química de las aguas. Para la confección de los mapas representados en las **figuras 3.1 a y b**, se elaboró una base de datos como se muestra en la **tabla 2.3 (Anexo III)**.

### **CAPÍTULO III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

En este capítulo se presentan los resultados de la caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas de la provincia Las Tunas con su clasificación y representación; los resultados de los experimentos de simulación del proceso de adquisición de la composición química de las aguas que drenan carbonatos y los patrones hidrogeoquímicos determinados en condiciones locales.

#### **3.1 Caracterización hidroquímica de las aguas subterráneas de Las Tunas**

La composición química de las aguas subterráneas en Las Tunas es muy variada, depende fundamentalmente, de la composición litológica y las condiciones estructurales del área, del clima, la geología e hidrogeología. En las **tablas 2.1 a, b y c**, se presentan en forma resumida las características litológicas y los puntos de muestreo representativos de cada formación geológica, distribuidos en los tres sectores hidrogeológicos de la provincia, **figura 1.3**. Con el objetivo de estudiar el control que determina la litología sobre la composición química de las aguas subterráneas, se tomaron muestras representativas de las diferentes litologías.

En la Cuenca Tunas Norte se seleccionaron seis pozos que se relacionan con los materiales acuíferos constitutivos de la Fm. Vázquez (P-12, P-87, P-104, P-19, P-Cocal II y P-175), tres pozos de la Fm. Puerto Padre, (P-Siete Aulas, P-Reparto Militar y P-53), dos de la Fm. Caobilla (P-Acueducto de Manatí y el P-105). Atendiendo a la composición litológica de los diferentes depósitos presentes en esta cuenca, **tabla 2.1 a**, debe esperarse que las aguas que drenan los sedimentos de la Fm. Puerto Padre, sean fundamentalmente de tipo hidrogenocarbonatadas cálcicas, mientras que las aguas que drenan el resto de los sedimentos posean, además de hidrogeno carbonato, iones  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ .

En la cuenca Sur de Las Tunas se seleccionaron 4 pozos, dos representativos de la Fm. Güines (P-292 y P-Las Maboas), uno de la Fm. Arroyo Palma (P-Carretera Amancio) y uno de la Fm. Yayal (P-139). De acuerdo con la composición litológica de este sector **tabla 2.1 b**, las aguas que drenan estos materiales deben ser, preferentemente, hidrogenocarbonatadas cálcicas magnésicas y sódicas.

En el Macizo Hidrogeológico del Cretácico fueron seleccionadas 16 fuentes, de las cuales 13 son pozos y 2 presas, entre ellas, un pozo representativo de la Fm. Jimaguayú (P-195); uno de la Fm. Yáquimo (P-45); uno de la Fm. Caobilla (P-32); 6 en la Fm. Contramaestre (P-248, P-Central Jobabo, P-Quinta Planta, Presa Cayojo I, Presa Cayojo II y Presa Rincón); 6 en la Fm. Guáimaro (P-Edificio del Parque, P-La Siberia, P-Alba Flores, P-Circunscripción 7, P-Cabecera de Colombia y P-MINAZ) y una muestra representativa de la Fm. Iberia (P-180). Debe esperarse que las aguas que drenan este sector posean una composición muy variada **tabla 2.1 c**, que refleje la del medio carbonatado y la de las tobas y basaltos: aguas hidrogenocarbonatadas cálcicas, magnésicas y sódicas.

En las **tablas 3.1 a, b y c**, se muestran los valores medios y las desviaciones estándares de las variables hidroquímicas de las cuencas estudiadas. Se observa como tendencia una concentración de cloruros relativamente alta y del TSS en la mayoría de las muestras analizadas, si se tiene en cuenta el criterio establecido por la **NC-93-02/85**, que considera como concentración máxima admisible para el TSS 1000 mg/L y para el cloruro 250 mg/L, lo que indica que en el proceso de adquisición de la composición química de estas aguas existe una gran influencia de sal procedente de un suelo salino o de formaciones geológicas salinizadas, aspecto este a definir en el marco de la tesis.

Con el propósito de apreciar con más facilidad la relación entre la composición química del agua y la constitución geológica de las cuencas, se crearon las **tablas 3.2 a, b y c**, que contienen los valores mínimos y máximos del TSS y la composición química relativa de acuerdo al criterio de Kurlov, (concentración iónica superior a 20 % meq/L). Este criterio fue utilizado para clasificar los distintos tipos de agua en la zona de estudio.

**Tabla 3.1 a. Valores medios de las variables hidroquímicas y desviación estándar. Cuenca Tunas Norte**

No.	Puntos de Muestreo	T <sup>o</sup> C	pH (U pH)	CO <sub>2</sub> (mg/L)	CE (μS/cm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/L)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (meq/L)	Cl <sup>-</sup> (meq/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (meq/L)	Ca <sup>2+</sup> (meq/L)	Mg <sup>2+</sup> (meq/L)	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> (meq/L)	CaCO <sub>3</sub> (mg/L)	TSS (mg/L)
1	P-12	25.0	7.61±0.44	4.9	930±72	6.13±0.78	0.13±0.43	2.84±0.43	0.44±0.24	4.18±0.52	2.61±0.47	2.75±0.80	340±32	679±60
2	P 87	25.0	7.50±0.47	24.3	918±256	6.12±1.17	0.09±0.32	2.17±1.64	0.77±0.51	4.16±1.00	2.18±1.17	2.81±1.68	317±70	665±162
3	P104	25.0	7.56±0.35	18.9	813±154	5.98±1.38	0.12±0.37	1.67±0.66	0.57±0.20	4.12±0.88	1.88±0.64	2.35±1.51	300±59	515±135
4	Pozo 53	25.0	7.90±0.60	19.6	1707±494	9.63±3.06	0.27±0.64	4.78±2.62	1.21±0.38	2.54±1.16	5.01±1.75	8.35±5.52	378±130	1127±324
5	Pozo 175	25.0	8.12±0.49	14.2	2085±171	13.76±1.08	0.64±0.83	5.45±0.79	2.31±1.27	1.17±0.25	3.59±0.68	17.41±1.51	238±38	1631±118
6	P-Cocal II	25.0	7.45±0.36	63.1	2333±143	14.53±1.79	0.00±0.00	11.86±0.35	1.95±0.63	3.36±0.57	7.59±1.65	17.39±2.58	548±84	1960±148
7	Pozo 19	25.0	7.63±0.34	16.7	1217±397	6.31±1.84	0.00±0.00	3.58±1.2	1.50±0.31	2.86±0.88	1.66±1.44	6.87±2.56	226±70	819±214
8	P-Siete A.	25.0	7.64±0.29	42.6	2315±607	18.81±1.72	0.00±0.00	6.74±1.07	1.49±0.33	3.31±0.37	4.61±0.80	18.11±2.23	447±33	2009±164
9	Rpto Militar	25.0	7.76±0.24	26.2	2776±418	17.19±0.36	0.00±0.00	11.42±1.45	2.56±0.27	3.58±0.33	6.57±0.95	21.03±1.51	507±53	2211±98

**Tabla 3.1 b. Valores medios de las variables hidroquímicas y desviación estándar. Cuenca Sur de Las Tunas**

No	Puntos de Muestreo	T <sup>o</sup> C	pH (U pH)	CO <sub>2</sub> (mg/L)	CE (μS/cm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/L)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (meq/L)	Cl <sup>-</sup> (meq/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (meq/L)	Ca <sup>2+</sup> (meq/L)	Mg <sup>2+</sup> (meq/L)	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> (meq/L)	CaCO <sub>3</sub> (mg/L)	TSS (mg/L)
10	Las Maboas	25.0	7.21±0.15	62.0	1416±47	12.21±1.48	0.00±0.00	4.83±0.28	1.12±0.08	6.86±0.19	5.31±0.33	6.00±1.52	609±24	1310±128
11	Pozo 292	25.0	7.68±0.30	17.7	1197±87	8.46±1.51	0.00±0.00	3.58±0.89	1.22±0.27	4.67±0.52	3.73±1.40	4.86±2.55	420±83	953±134
12	C. Amancio	25.0	7.42±0.44	32.9	1551±239	8.72±0.85	0.00±0.00	5.87±1.97	1.27±0.61	3.91±0.98	4.23±1.48	7.73±2.68	407±82	1109±142
13	Pozo 139	25.0	7.66±0.55	20.8	1031±166	6.89±1.17	0.00±0.00	2.86±1.12	0.62±0.22	5.31±1.27	1.61±1.81	3.47±1.51	346±102	757±108±

**Tabla 3.1 c. Valores medios de las variables hidroquímicas y desviación estándar. Macizo Hidrogeológico del Cretácico**

No.	Puntos de Muestreo	T/°C	pH (U pH)	CO <sub>2</sub> (mg/L)	CE (μS/cm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (meq/L)	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (meq/L)	Cl <sup>-</sup> (meq/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (meq/L)	Ca <sup>2+</sup> (meq/L)	Mg <sup>2+</sup> (meq/L)	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> (meq/L)	CaCO <sub>3</sub> (mg/L)	TSS (mg/L)
14	Pozo 195	25.0	7.44±0.35	25.8	659±92	5.81±0.40	0.00±0.00	0.86±0.13	0.32±0.07	4.63±0.13	1.33±0.19	1.03±0.51	298±13	533±37
15	Pozo 45	25.0	7.35±0.18	14.5	1396±153	3.70±0.42	0.00±0.00	3.74±0.19	0.84±0.06	1.57±0.21	4.42±0.25	2.30±0.56	299±13	537±43
16	Pozo 32	25.0	7.92±0.71	45.3	3023±580	14.63±0.6	0.75±0.88	15.71±0.48	3.08±0.63	1.90±0.47	5.95±0.53	26.32±0.91	393±13	2336±61
17	Pozo 248	25.0	7.61±0.27	9.1	626±25	3.61±0.18	0.00±0.00	5.06±0.23	1.02±0.14	3.06±0.22	3.25±0.41	3.37±4.94	316±25	627±26
18	Psa Rincón	25.0	6.88±8.44	16.1	688±844	3.55±1.22	0.00±0.00	2.40±1.09	0.34±0.40	1.57±0.67	1.39±1.08	3.33±1.40	148±67	442±139
19	PsaCayojo1	25.0	7.68±0.46	7.8	578±312	2.82±1.70	0.11±0.39	2.25±1.36	0.36±0.45	1.28±0.54	1.08±0.51	3.19±2.53	118±43	385±230
20	PsaCayojo2	25.0	7.78±0.53	7.6	486±304	3.21±2.21	0.23±0.57	2.48±2.26	0.33±0.24	1.46±0.75	1.25±1.00	3.77±4.37	135±83	445±83
21	CentJobabo	25.0	7.90±0.62	23.0	1966±632	10.33±1.66	0.16±0.47	9.44±1.46	1.10±0.19	6.52±1.09	4.54±0.49	9.98±3.27	553±53	1438±206
22	QuintPlanta	25.0	7.83±0.27	17.1	2229±464	11.12±1.30	0.00±0.00	9.27±0.84	0.96±0.36	6.76±1.14	3.95±0.81	10.64±1.59	536±73	1481±110
23	Edif.Parque	25.0	7.80±0.39	19.1	1397±286	9.83±0.79	0.10±0.31	3.57±0.20	0.72±0.10	6.20±0.15	3.95±0.26	4.08±0.64	507±10	1030±63
24	La Siberia	25.0	7.82±0.61	27.4	1396±130	11.81±1.44	0.00±0.00	5.91±0.39	1.53±0.11	7.52±0.67	6.47±0.63	5.26±1.48	700±37	1354±118
25	Alba Flora	25.0	7.60±0.38	28.6	884±173	10.16±0.53	0.00±0.00	2.92±0.60	1.12±0.31	3.11±0.73	3.39±0.69	7.70±1.74	325±62	1058±74
26	Circuns. 7	25.0	7.73±0.25	27.7	1458±130	16.54±0.56	0.00±0.00	5.65±0.80	4.47±1.18	7.19±0.28	4.44±0.40	15.03±2.16	582±23	1968±154
27	CaColombia	25.0	7.54±0.50	52.3	1397±154	13.26±2.24	0.00±0.00	3.97±0.48	1.35±0.15	6.62±0.72	2.97±0.16	8.99±2.50	480±42	1391±202
28	MINAZ	25.0	7.54±0.50	25.0	793±161	8.47±0.69	0.00±0.00	3.98±0.18	0.88±0.06	4.21±0.27	5.54±0.60	3.57±0.80	488±28	933±58
29	Pozo 180	25.0	7.86±0.58	29.7	1489±146	13.16±1.11	0.60±0.83	3.51±0.56	0.76±0.13	1.63±0.24	4.90±0.58	11.49±1.10	327±37	1338±116
30	P105 Cana	25.0	7.40±0.56	30.3	1054±207	5.67±0.87	0.21±0.38	3.13±1.72	1.01±0.51	4.67±1.28	2.10±0.70	3.24±1.52	339±65	705±122
31	Acto Manatí	25.0	8.54±0.55	9.1	2320±100	22.14±1.57	1.69±1.93	13.53±2.24	3.01±0.83	1.63±0.48	3.54±0.71	35.21±2.38	258±49	2911±155

En la **tabla 3.2 a** se muestran los tipos de agua determinados en la Cuenca Tunas Norte. Se aprecian dos tipos, en el primero las aguas (composición media) son, fundamentalmente, de tipo hidrogenocarbonatadas cloruradas cálcicas sódicas magnésicas, con una mineralización que oscila entre 227 y 1 706 mg/L y en el segundo, predominan las hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas magnésicas, donde la mineralización varía entre 679 y 3 212 mg/L.

En las aguas del primer tipo, los valores medios no sobrepasan 1 g/L, mientras que en las del segundo los valores son superiores a 1g/L, debido a que estos pozos se encuentran en cotas del terreno inferiores a los 10 m y entre los 10 y 13 km de distancia de la costa, por lo que la explotación de sus niveles por debajo de la cota de 10 m; es decir, descensos en los pozos superior a los 15 m, provoca el avance del agua desde la zona costera hacia la parte continental (zona de mezcla), lo que incide directamente en el aumento de la mineralización y de otros elementos como los cloruros y el sodio.

En la **tabla 3.2 b** se reportan los resultados correspondientes a las aguas de la Cuenca Sur de Las Tunas, donde el agua es hidrogenocarbonatada clorurada y prevalecen los cationes calcio, magnesio y sodio. Los valores máximos de dos de estas fuentes, (P-Carretera Amancio y P-139), indican que son cloruradas hidrogenocarbonatadas, en las que prevalece la concentración del ion sodio sobre el ion calcio. La mineralización oscila entre 482 y 1 657 mg/L. Los valores medios obtenidos se encuentran entre 800 y 1 553 mg/L.

En la **tabla 3.2 c** se presentan los resultados correspondientes al Macizo Hidrogeológico del Cretácico, en la cual se distinguen varios tipos de agua, que muestran la diversidad de litologías presentes en este macizo, **tabla 2.1 c**.

Tipo 1. Las aguas se caracterizan por ser cloruradas hidrogenocarbonatadas sódicas o hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas magnesianas, con una mineralización que varía entre 1 164 y 2 404 mg/L. Los valores medios se comportan entre 1 338 y 2 336 mg/L (P-32 y P-180).

**Tabla 3.2 a. Valores mínimos y máximos de TSS y la composición química relativa de las aguas. Cuenca Tunas Norte**

Formación	Sitio	Punto de muestreo	N	TSS			Tipo de agua		
				Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
Vázquez	Pto Padre	P-12	30	561	701	881	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>
Vázquez	Pto Padre	P-104	143	227	626	1056	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> >Na <sup>+</sup> >Ca <sup>2+</sup>
Vázquez	Pto Padre	P-87	101	375	675	1706	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>
Vázquez	Manatí	P-19	48	382	831	1343	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Ca <sup>2+</sup>
Vázquez	Menéndez	P-175	68	1156	1514	1691	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup>
Vázquez	Menéndez	El Cocal II	25	1741	1902	2143	Cl <sup>-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>
Pto.Padre	Pto Padre	Siete Aulas	13	1816	2009	2283	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup>
Pto.Padre	Pto Padre	Rpto Militar	9	2012	2211	2339	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup>
Pto.Padre	Menéndez	P-53	52	679	1184	1856	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup> >Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup>
Caobilla	Manatí	Acto Manatí	24	2483	2768	3212	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup>
Caobilla	Pto Padre	P-105	34	531	728	1022	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>

**Tabla 3.2 b. Valores mínimos y máximos del TSS y la composición química relativa de las aguas. Cuenca Sur de Las Tunas**

Formación	Sitio	Puntos de muestreo	N	TSS			Tipo de agua		
				Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
Güines	Amancio	Las Maboas	22	980	1173	1411	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>
Güines	Amancio	P-292	12	787	953	1258	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Ca <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Ca <sup>2+</sup>
Ar Palma	Amancio	Carret. Amancio	47	751	1553	1657	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup> >Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Ca <sup>2+</sup>
Yayal	Colombia	P-139 (San José)	38	482	800	1132	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Cl <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> >Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>

**Tabla 3.2 c. Valores mínimos y máximos de TSS y la composición química relativa de las aguas. Macizo del Cretácico**

Formación	Sitio	Puntos de muestreo	N	TSS			Tipos de agua		
				Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
Jimaguayú	Colombia	P-195	16	454	533	584	$\text{HCO}_3^- \text{ Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- \text{ Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- \text{ Ca}^{2+} > \text{Na}^+$
Yáquimo	Amancio	P-45	12	418	462	542	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- \text{ Mg}^{2+} > \text{Na}^+$	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- \text{ Mg}^{2+} > \text{Na}^+$	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- \text{ Mg}^{2+} > \text{Na}^+$
Caobilla	Manatí	P-32	14	2255	2336	2404	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- \text{ Na}^+$	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- \text{ Na}^+$	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- \text{ Na}^+$
Contramt	Majibacoa	Presa Rincón	84	221	441	873	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$
Contramt	Las Tunas	Presa Cayoyo I	14	196	385	1896	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- \text{ Na}^+$
			7						
Contramt	Las Tunas	Presa Cayoyo II	63	213	445	1900	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- \text{ Na}^+$
Contramt	Jobabo	Central Jobabo	23	1124	1438	1924	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
Contramt	Jobabo	Quinta Planta	17	1359	1481	1776	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$
Contramt	Jobabo	P-248	60	1113	1281	1382	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- \text{ Mg}^{2+} \text{ Ca}^{2+} > \text{Na}^+$	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- \text{ Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$	$\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
Guáimaro	Colombia	Edif Parque	10	922	1030	1120	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$
Guáimaro	Colombia	La Siberia	12	1202	1354	1606	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
Guáimaro	Colombia	Alba Flores	25	899	977	1047	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- \text{ HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+$
Guáimaro	Colombia	Circunscrip 7	11	1735	1968	2159	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$
Guáimaro	Colombia	Cabec. Colombia	13	1182	1391	1634	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$
Guáimaro	Colombia	MINAZ Colombia	13	852	933	1030	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$
Iberia	Pto Padre	P-180	12	1164	1338	1577	$\text{HCO}_3^- \text{ Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{ Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$

Tipo 2. La composición media de estas aguas es de tipo hidrogenocarbonatada cálcica, con un valor de mineralización que varía entre 454 y 584 mg/L, siendo el valor medio 533 mg/L. (P-195).

Tipo 3. Las aguas se caracterizan por ser hidrogenocarbonatadas cloruradas magnésicas cálcicas sódicas, así como cloruradas hidrogenocarbonatadas magnésicas sódicas, con una mineralización que varía entre 418 y 1 030 mg/L. Los valores medios están entre 462 y 933 mg/L. (P-45 y P-MINAZ).

Tipo 4. Las aguas son hidrogenocarbonatadas cloruradas o cloruradas hidrogenocarbonatadas, con una distribución variada de los iones sodio, calcio y magnesio. La mineralización de esta agua varía entre 196 y 2 159 mg/L. Los valores medios se encuentran entre 441 y 1 968 mg/L. (las restantes muestras).

En el caso del P-Circunscripción 7, en la porción sur, la mineralización pudiera deberse a las sales de origen marino disueltas en las rocas, así como el aporte de aguas profundas del tipo cloruradas sódicas, que ascendieron a la superficie a través de los sistemas de fallas y grietas producidas por movimientos neotectónicos.

### **3. 2 Caracterización hidroquímica espacial**

En la **figura 3.1 a**, se aprecia la distribución espacial del TSS determinados en las aguas analizadas en Las Tunas. De las fuentes estudiadas, 18 pozos presentan valores medios entre 1000 y 3000 mg/L, los que son elevados según la NC-93-03/85. Estos resultados indican la gran mineralización de las aguas subterráneas como resultado del proceso de interacción agua-roca.

En la **figura 3.1 b**, se aprecia una distribución de los cloruros determinados en las fuentes estudiadas. Se observa que diez de ellas poseen valores entre 200 y 500 mg/L, los cuales son elevados según el criterio establecido en la **NC-93-02/85**. En general, el tipo de agua, al igual que su concentración, está determinado, fundamentalmente, por las características litológicas y las peculiaridades climáticas de la región.

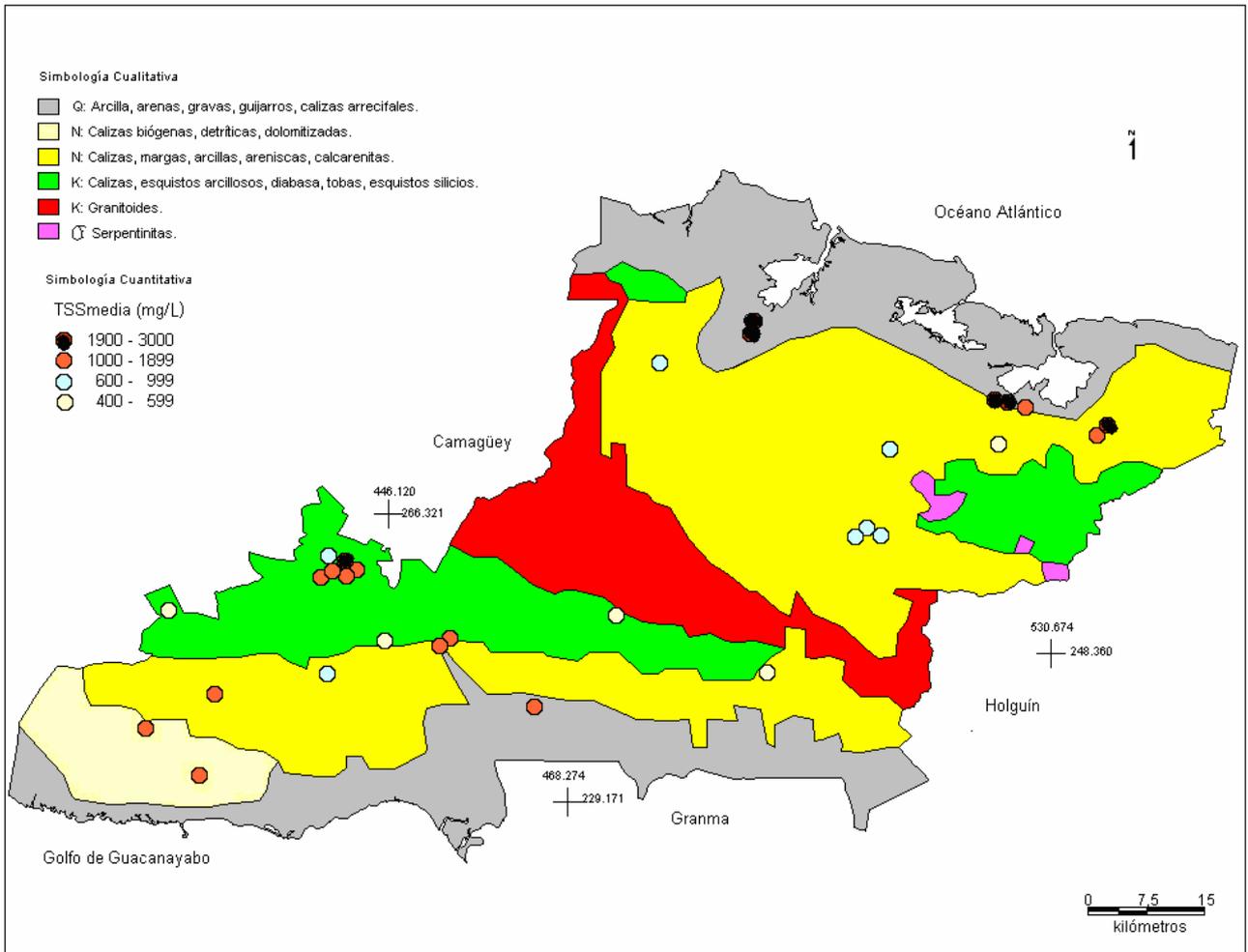


Figura 3.1 a. Distribución espacial de los valores de SST de las aguas de abasto de la provincia Las Tunas. Distribución espacial de los valores de SST de las aguas de abasto de la provincia Las Tunas.

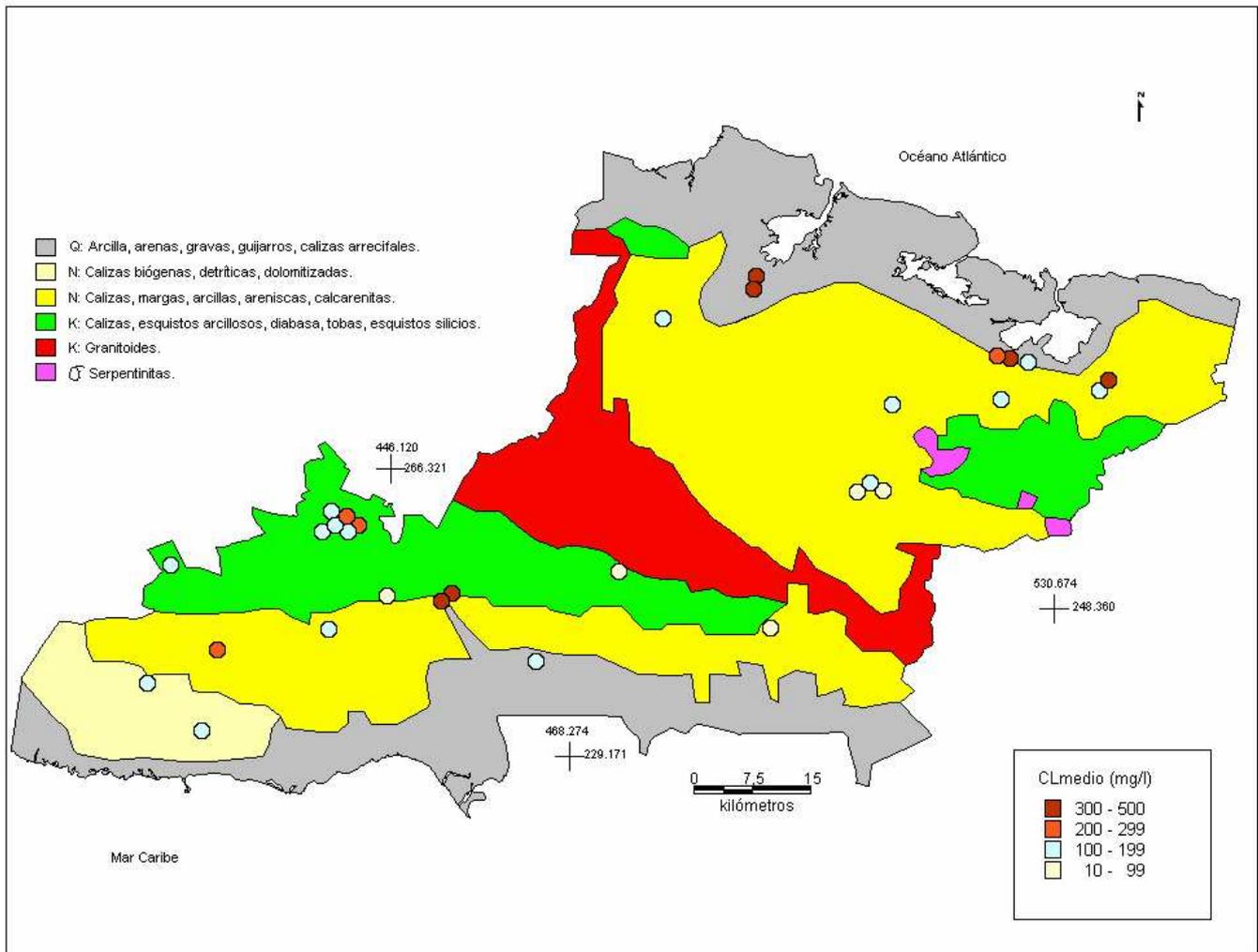


Figura 3.1 b. Distribución espacial de los contenidos de Cloruro de las aguas de abasto de la provincia Las Tunas.

### 3.3 Patrones hidrogeoquímicos de los principales medios geológicos en Las Tunas

En el capítulo I, epígrafe 1.9 se hace referencia a la teoría de los patrones hidrogeoquímicos y se discutió la posibilidad de expresar la concentración de un agua mediante combinaciones numéricas de  $27 \times 27 = 729$  patrones, como se muestra en la **tabla 1.1**, los cuales fueron establecidos por **J. R. Fagundo (1998)**. En general, el patrón hidrogeoquímico de un agua es una relación numérica entre los aniones y cationes contenidos en ella debido a procesos de interacción entre el agua y los minerales constitutivos de las rocas durante el proceso de intemperismo, de modo que en cada uno de estos procesos se forman patrones característicos.

Teniendo en cuenta la complejidad de la composición química de las aguas en Las Tunas, donde la mayor parte de las muestras tienen un elevado contenido de iones cloruro e iones sodio (**tabla 3.1 a, b, c**), en las **tablas 3.3 a, b, c** se presentan los patrones hidrogeoquímicos correspondientes a cada punto de muestreo, distribuidos por cada una de las cuencas hidrogeológicas de la provincia, así como nuevos patrones obtenidos mediante la extracción del cloruro de sodio y los componentes iónicos del agua de lluvia, los que se le ha denominado patrones extraídos. Para facilitar la interpretación de los resultados presentados en las **tablas 3.3 a, b, c**, se hace una distribución de las muestras por grupos y patrones como se muestra en la **tabla 3.4**, teniendo en cuenta el siguiente criterio:

El grupo I contiene los patrones (a los que se les ha extraído el NaCl) en los cuales el contenido relativo de calcio es mayor que el de magnesio y no presentan sodio. La relación  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  varía entre 8:1 y 5:4 (**figura 3.2 a**).

El grupo II contiene los patrones (a los que se les ha extraído el NaCl) en los que el calcio es mayor que el magnesio, pero contiene además, el sodio. La relación  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  es: 3:2, 5:2 y 5:3 (**figura 3.2 b**).

El grupo III contiene los patrones (a los que se les ha extraído el NaCl) en los cuales el magnesio es mayor que el calcio y poseen además, el sodio. La relación  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  varía entre 1:1-1:3 y 2:3 - 2:5 (**figura 3.2 b**).

**Tabla 3.3 a. Patrones originales y a los que se le han extraídos los componentes del agua de lluvia y el Cloruro de Sodio. Cuenca Tunas Norte**

Muestra	Patrones Originales			Patrones Extraídos		
	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
P-19	523-325	613-361	721-271	145-163	532-172	523-172
P-87	541-451	352-271	613-532	154-181	163-181	136-163
P-12	253-361	352-361	352-361	163-181	163-181	163-181
P-104	361-271	352-271	532-361	181-181	163-181	541-181
P-105	541-361	352-361	541-253	154-181	163-181	352-172
P-53	523-361	523-361	811-631	136-172	325-181	613-181
P-175	712-271	811-271	712-352	235-181	712-181	325-172
Acto Manatí	811-361	811-361	811-451	811-181	811-181	811-181
El Cocal II	523-451	613-451	712-451	136-181	325-181	523-181
Siete Aulas	613-361	712-271	712-361	523-181	613-181	712-181
Reparto Militar	712-361	712-451	712-451	523-181	523-181	523-181

**Tabla 3.3 b. Patrones originales y a los que se le han extraídos los componentes del agua de lluvia y el Cloruro de Sodio. Cuenca Sur de Las Tunas**

Muestra	Patrones Originales			Patrones Extraídos		
	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
P-139	352-451	352-361	523-541	172-181	172-181	145-181
Carret. Amancio	154-361	523-451	721-631	154-181	145-181	154-181
Las Maboas	253-361	352-361	532-361	154-181	154-181	253-181
P-292	631-361	532-361	532-361	352-181	154-181	532-181

**Tabla 3.3 c. Patrones originales y a los que se le han extraídos los componentes del agua de lluvia y el Cloruro de Sodio. Macizo Hidrogeológico del Cretácico**

Muestra	Patrones Originales			Patrones Extraídos		
	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
P-32	712-541	712-451	712-451	523-172	613-181	613-181
P-180	613-181	712-271	712-271	523-181	613-181	613-181
Alba Flores	523-271	523-272	712-361	523-181	523-181	712-181
Edificio del Parque	253-271	352-271	352-271	163-181	163-181	163-181
Circunscripción 7	532-271	532-271	631-352	352-172	532-172	532-172
La Siberia	523-271	253-36-1	532-361	145-181	154-181	154-181
Cabecera Colombia	631-361	532-271	631-271	532-181	532-181	451-181
MINAZ Colombia	235-361	235-361	325-361	145-181	145-181	145-181
P-195	181-181	172-181	172-181	181-181	172-181	172-181
P-45	325-451	325-541	325-541	127-172	127-172	127-172
Presa Rincón	532-451	532-451	532-451	253-181	253-181	136-181
Presa Cayojo I	532-451	532-451	712-541	145-181	253-181	523-172
Presa Cayojo II	532-451	532-451	712-451	235-181	253-181	613-181
P-248	235-631	523-541	532-541	145-181	145-181	154-181
Central Jobabo	352-451	532-451	631-451	163-181	154-181	253-181
Quinta Planta	532-451	532-451	631-451	352-181	163-181	352-181

**Tabla 3.4. Distribución de las muestras por grupos y patrones hidrogeoquímicos**

Grupo	Patrón hidrogeoquímico resultante de la extracción de NaCl	Tipo de agua del patón sin NaCl.	Puntos de muestreo
Grupo I (Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup> )	Patrón II (172-181)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >Ca <sup>2+</sup>	P-195
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	P-139
	Patrón III (163-181)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	P-104
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	P-105
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	P-87
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	P-12
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	P-Quinta Planta
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	P-Edificio Parque
	Patrón IV (154-181)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	P-La Siberia
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	P-Las Maboas
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	P-292
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	P-Central Jobabo
	Patrón V (145-181) Dolomita	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	P-248
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup>	P-Carretera Amancio
Grupo II (Na <sup>+</sup> , Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup> )	Patrón VII (532-181)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> , >Ca <sup>2+</sup>	P-19
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> , >Ca <sup>2+</sup>	P-Circunscripción 7
	Patrón VIII (352-181)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup>	P-Cabec. Colombia
	Patrón IX (253-181)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> ,	Presa Rincón
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> ,	Presa Cayojo I
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Ca <sup>2+</sup> >Mg <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> ,	Presa Cayojo II		
Grupo III (Na <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> >Ca <sup>2+</sup> )	Patrón X (811-181)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> ,	P-Acueducto Manatí
	Patrón XI (712-181)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na>Mg <sup>2+</sup>	P-175
	Patrón XII (613-181)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> , >Mg <sup>2+</sup>	P-180
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> , >Mg <sup>2+</sup>	P-32
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> , >Mg <sup>2+</sup> >Ca <sup>2+</sup>	P-Siete Aulas
	Patrón XIII (523-181)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na>Mg <sup>2+</sup> >Ca <sup>2+</sup>	P-Reparto Militar
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Na <sup>+</sup> , >Mg <sup>2+</sup>	P-Alba Flores
	Patrón XIV (325-181)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Mg <sup>2+</sup> >Na	P-53
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Mg <sup>2+</sup> >Na		P-El Cocal	
Grupo IV (Mg <sup>2+</sup> >Ca <sup>2+</sup> )	Patrón V (145-181) Serpentinita	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Mg <sup>2+</sup> >Ca <sup>2+</sup>	P-MINAZ
	Patrón VI (127-181)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -Mg <sup>2+</sup> >Ca <sup>2+</sup>	P-45

El grupo IV contiene los patrones (a los que se les ha extraído el NaCl) en los que el magnesio es mayor que el calcio, pero el sodio está ausente. La relación Ca<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup> varía entre 4:5 y 2:7 (**figura 3.2 a**).

En la **tabla 3.4** se aprecia que en la provincia de Las Tunas existen cuatro grupos de agua, atendiendo a los principales cationes que son extraídos en el proceso de interacción agua-roca. En forma gráfica estos patrones se ilustran mediante diagramas de Stiff (1951),

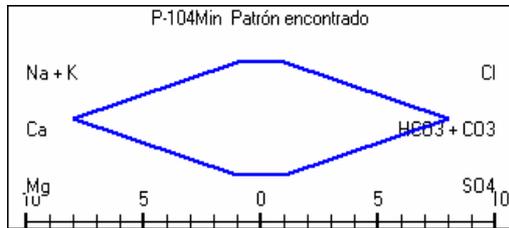
en las **figuras 3.2 a y 3.2 b** y a partir de la concentración en mol/L, es que se determina, por MODELAGUA el tipo de patrón hidrogeoquímico.

En la **tabla 3.5 a y b**, se muestran, respectivamente, las concentraciones y relaciones iónicas de los grupos y patrones definidos en la **tabla 3.4**. El conjunto de estas relaciones son similares entre sí para cada patrón y aproximadamente para cada grupo, corroborando la homogeneidad de los mismos. Si en diferentes cuencas existen rocas compuestas por minerales semejantes, las aguas que las drenan pueden originar patrones hidrogeoquímicos similares.

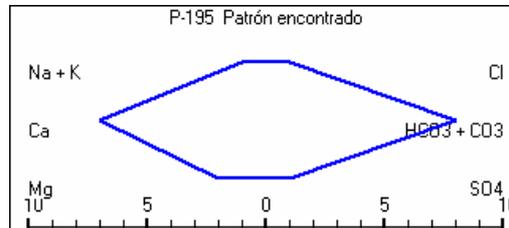
Sedimentos correspondientes a formaciones geológicas originadas en diferentes condiciones de sedimentación o transformación, (en medios lacustre, marino, ríos, emisiones de lavas, rocas magmáticas, metamórficas), en diferentes edades, pueden contener minerales que podrán ser o no similares, pero que mediante la interacción agua-roca que tiene lugar en el proceso de intemperismo, originan aguas de composición química similar.

En Las Tunas, las características geológicas de las cuencas son complejas, ya que en superficie existen formaciones sedimentarias constituidas por calizas puras (formadoras de aguas del tipo I, hidrogenocarbonatadas cálcicas), calizas dolomitizadas y dolomías (formadoras de aguas del grupo II, hidrogenocarbonatadas cálcicas magnesianas), areniscas (formadoras de aguas del grupo III, hidrogenocarbonatadas sódicas) y serpentinitas y otras rocas ultrabásicas (formadoras de aguas del grupo IV, hidrogenocarbonatadas magnesianas); así como mezclas de litologías y aportes de cloruro de sodio de los suelos en la zona no saturada de los acuíferos.

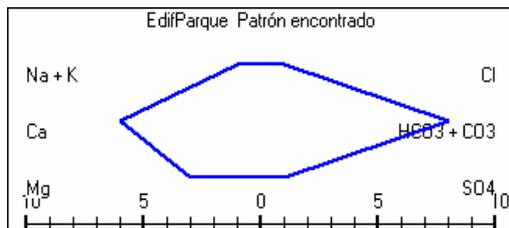
Grupo I (Ca>Mg)



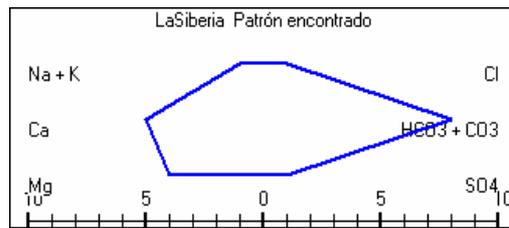
PH I: 181-181



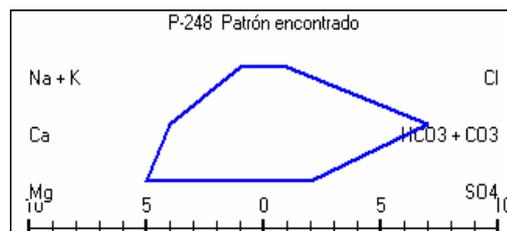
PH II: 172-181



PH III: 163-181

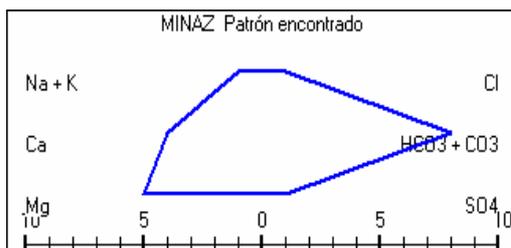


PH IV: 154-181

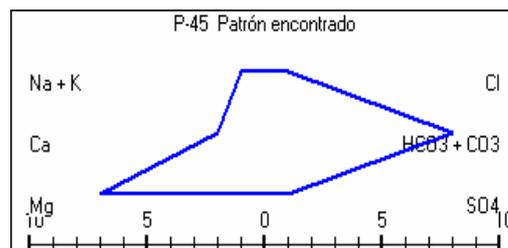


PH V: 145-181

Grupo IV (Mg>Ca)



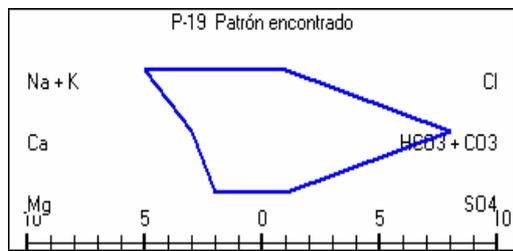
PH V: 145-181



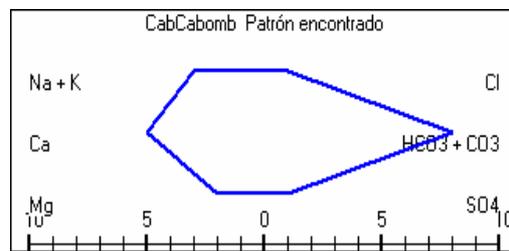
PH VI: 127-181

Figura 3.2.a. Patrones hidrogeoquímicos extraídos correspondientes a cada grupo de agua de la provincia de las Tunas. Grupos I y IV.

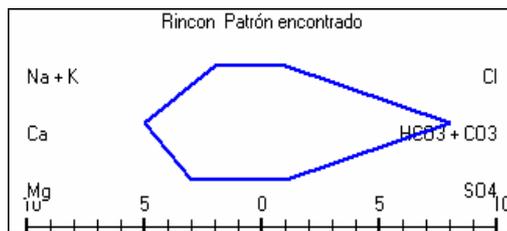
Grupo II (Na, Ca>Mg)



PH VII: 532-181

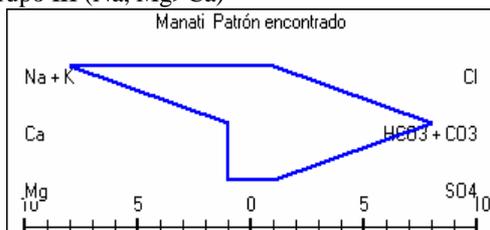


PH VIII: 352-181

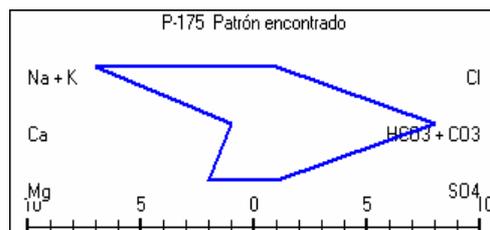


PH IX: 253-181

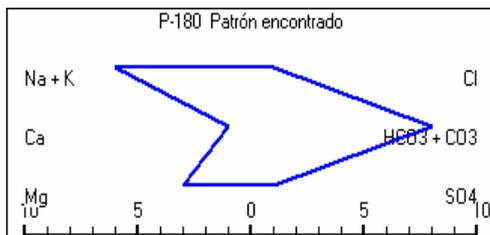
Grupo III (Na, Mg>Ca)



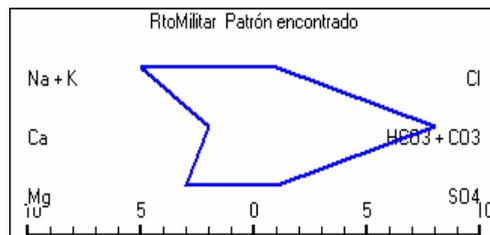
PH X: 811-181



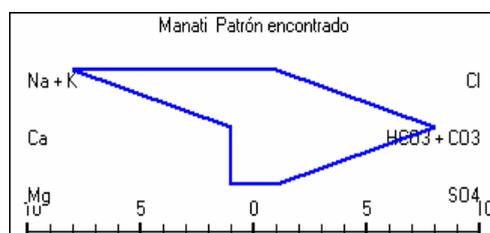
PH XI: 712-181



PH XII: 613-181



PH XIII: 523-181



PH XIV: 325-181

Figura 3.2.b. Patrones hidrogeoquímicos extraídos correspondientes a cada grupo de agua de la provincia de las Tunas. Grupos II y III.

**Tabla 3.5 a. Concentraciones iónicas medias (en meq/L y mmol/L) de los diferentes grupos de agua y patrones hidrogeoquímicos. Provincia Las Tunas**

No.	Muestra	Grupo	Patrón	meq/L						meq/L					
				HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>
1	Pozo 12	1	3	6.26	2.84	0.44	4.18	2.61	2.75	6.26	2.84	0.22	2.09	1.31	2.75
2	P 87 Tunas	1	3	6.21	2.17	0.77	4.16	2.18	2.81	6.21	2.17	0.39	2.08	1.09	2.81
3	P104 Cana	1	3	6.10	1.67	0.57	4.12	1.88	2.35	6.10	1.67	0.29	2.06	0.94	2.35
4	P105 Cana	1	3	5.88	3.13	1.01	4.67	2.10	3.24	5.88	3.13	0.51	2.34	1.05	3.24
12	Las Maboas	1	4	12.21	4.83	1.12	6.86	5.31	6.00	12.21	4.83	0.56	3.43	2.66	6.00
13	Pozo 292	1	4	8.46	3.58	1.22	4.67	3.73	4.86	8.46	3.58	0.61	2.34	1.87	4.86
14	C. Amancio	1	5	8.72	5.87	1.27	3.91	4.23	7.73	8.72	5.87	0.64	1.96	2.12	7.73
15	Pozo 139	1	2	6.89	2.86	0.62	5.31	1.61	3.47	6.89	2.86	0.31	2.66	0.81	3.47
16	Pozo 195	1	2	5.81	0.86	0.32	4.63	1.33	1.03	5.81	0.86	0.16	2.32	0.67	1.03
19	Pozo 248	1	5	3.61	5.06	1.02	3.06	3.25	3.37	3.61	5.06	0.51	1.53	1.63	3.37
23	Cent.Jobabo	1	4	10.49	9.44	1.10	6.52	4.54	9.98	10.49	9.44	0.55	3.26	2.27	9.98
24	Quint.Planta	1	3	11.12	9.27	0.96	6.76	3.95	10.64	11.12	9.27	0.48	3.38	1.98	10.64
25	Edif.Parque	1	3	9.93	3.57	0.72	6.20	3.95	4.08	9.93	3.57	0.36	3.10	1.98	4.08
26	La Siberia	1	4	11.81	5.91	1.53	7.52	6.47	5.26	11.81	5.91	0.77	3.76	3.24	5.26
9	Pozo 19	2	7	6.31	3.58	1.50	2.86	1.66	6.87	6.31	3.58	0.75	1.43	0.83	6.87
20	Psa Rincón	2	9	3.55	2.40	0.34	1.57	1.39	3.33	3.55	2.40	0.17	0.79	0.70	3.33
21	PsaCayojo1	2	9	2.93	2.25	0.36	1.28	1.08	3.19	2.93	2.25	0.18	0.64	0.54	3.19
22	PsaCayojo2	2	9	3.44	2.48	0.33	1.46	1.25	3.77	3.44	2.48	0.17	0.73	0.63	3.77
28	Circuns. 7	2	7	16.54	5.65	4.47	7.19	4.44	15.03	16.54	5.65	2.24	3.60	2.22	15.03
29	CaColombia	2	8	13.26	3.97	1.35	6.62	2.97	8.99	13.26	3.97	0.68	3.31	1.49	8.99
5	Pozo 53	3	14	9.90	4.78	1.21	2.54	5.01	8.35	9.90	4.78	0.61	1.27	2.51	8.35
7	El Cocal I	3	14	14.53	11.86	1.95	3.36	7.59	17.39	14.53	11.86	0.98	1.68	3.80	17.39
6	Pozo 175	3	11	14.40	5.45	2.31	1.17	3.59	17.41	14.40	5.45	1.16	0.59	1.80	17.41
8	Acto Manatí	3	10	23.83	13.53	3.01	1.63	3.54	35.21	23.83	13.53	1.51	0.82	1.77	35.21
10	Siete Aulas	3	12	18.81	6.74	1.49	3.31	4.61	18.11	18.81	6.74	0.75	1.66	2.31	18.11
11	Rpto. Militar	3	13	17.19	11.42	2.56	3.58	6.57	21.03	17.19	11.42	1.28	1.79	3.29	21.03
18	Pozo 32	3	12	15.38	15.71	3.08	1.90	5.95	26.32	15.38	15.71	1.54	0.95	2.98	26.32
27	Alba Flora	3	13	10.16	2.92	1.12	3.11	3.39	7.70	10.16	2.92	0.56	1.56	1.70	7.70
31	Pozo 180	3	12	13.76	3.51	0.76	1.63	4.90	11.49	13.76	3.51	0.38	0.82	2.45	11.49
17	Pozo 45	4	6	3.70	3.74	0.84	1.57	4.42	2.30	3.70	3.74	0.42	0.79	2.21	2.30
30	MINAZ	4	5	8.47	3.98	0.88	4.21	5.54	3.57	8.47	3.98	0.44	2.11	2.77	3.57

**Tabla 3.5 b. Relaciones iónicas (en mmol/L) de los diferentes grupos de agua y patrones hidrogeoquímicos de las aguas estudiadas en la provincia Las Tunas**

No.	Muestra	Grupo	Patrón	Cl <sup>-</sup> / Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> / Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup> / SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup> / HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Mg <sup>2+</sup> / HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup> / HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup> / Ca <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> / Mg <sup>2+</sup>
1	Pozo 12	1	3	1.03	1.60	9.50	0.04	0.33	0.21	0.44	1.32	2.11
2	P 87 Tunas	1	3	0.77	1.91	5.40	0.06	0.33	0.18	0.45	1.35	2.58
3	P104 Cana	1	3	0.71	2.19	7.23	0.05	0.34	0.15	0.39	1.14	2.50
4	P105 Cana	1	3	0.97	2.22	4.62	0.09	0.40	0.18	0.55	1.39	3.09
12	Las Maboas	1	4	0.81	1.29	6.13	0.05	0.28	0.22	0.49	1.75	2.26
13	Pozo 292	1	4	0.74	1.25	3.83	0.07	0.28	0.22	0.57	2.08	2.61
14	C. Amancio	1	5	0.76	0.92	3.08	0.07	0.22	0.24	0.89	3.95	3.65
15	Pozo 139	1	2	0.82	3.30	8.56	0.04	0.39	0.12	0.50	1.31	4.31
16	Pozo 195	1	2	0.83	3.48	14.47	0.03	0.40	0.11	0.18	0.44	1.55
19	Pozo 248	1	5	1.50	0.94	3.00	0.14	0.42	0.45	0.93	2.20	2.07
23	CentJobabo	1	4	0.95	1.44	5.93	0.05	0.31	0.22	0.95	3.06	4.40
24	QuintPlanta	1	3	0.87	1.71	7.04	0.04	0.30	0.18	0.96	3.15	5.39
25	Edif.Parque	1	3	0.88	1.57	8.61	0.04	0.31	0.20	0.41	1.32	2.07
26	La Siberia	1	4	1.12	1.16	4.92	0.06	0.32	0.27	0.45	1.40	1.63
9	Pozo 19	2	7	0.52	1.72	1.91	0.12	0.23	0.13	1.09	4.80	8.28
20	Psa Rincón	2	9	0.72	1.13	4.62	0.05	0.22	0.20	0.94	4.24	4.79
21	PsaCayojo1	2	9	0.71	1.19	3.56	0.06	0.22	0.18	1.09	4.98	5.91
22	PsaCayojo2	2	9	0.66	1.17	4.42	0.05	0.21	0.18	1.10	5.16	6.03
28	Circuns. 7	2	7	0.38	1.62	1.61	0.14	0.22	0.13	0.91	4.18	6.77
29	CaColombia	2	8	0.44	2.23	4.90	0.05	0.25	0.11	0.68	2.72	6.05
5	Pozo 53	3	14	0.57	0.51	2.10	0.06	0.13	0.25	0.84	6.57	3.33
7	El Cocal I	3	14	0.68	0.44	1.72	0.07	0.12	0.26	1.20	10.35	4.58
6	Pozo 175	3	11	0.31	0.33	0.51	0.08	0.04	0.12	1.21	29.76	9.70
8	Acto Manatí	3	10	0.38	0.46	0.54	0.06	0.03	0.07	1.48	43.20	19.89
10	Siete Aulas	3	12	0.37	0.72	2.22	0.04	0.09	0.12	0.96	10.94	7.86
11	Rpto Militar	3	13	0.54	0.54	1.40	0.07	0.10	0.19	1.22	11.75	6.40
18	Pozo 32	3	12	0.60	0.32	0.62	0.10	0.06	0.19	1.71	27.71	8.85
27	Alba Flora	3	13	0.38	0.92	2.78	0.06	0.15	0.17	0.76	4.95	4.54
31	Pozo 180	3	12	0.31	0.33	2.14	0.03	0.06	0.18	0.84	14.10	4.69
17	Pozo 45	4	6	1.63	0.36	1.87	0.11	0.21	0.60	0.62	2.93	1.04
30	MINAZ	4	5	1.11	0.76	4.78	0.05	0.25	0.33	0.42	1.70	1.29

Por otro lado, en zonas no muy profundas yacen sedimentos del basamento plegado constituido por rocas volcánicas de diferente composición, pertenecientes al macizo Cretácico de Las Tunas, por lo que se presentan en una misma cuenca aguas de diferentes tipos y patrones hidrogeoquímicos que puedan o no ser similares a los de otras cuencas. Por ello, precisar este complejo comportamiento hidrogeoquímico y el origen de la calidad del agua de la provincia, basado en el análisis de los patrones hidrogeoquímicos y otras herramientas de la hidrogeoquímica, constituye uno de los objetivos de esta tesis.

En la **figura 3.1 c**, se ilustra la distribución espacial de los patrones hidrogeoquímicos determinados para las fuentes más representativas de la provincia, los que reflejan la relación existente entre la composición química de las aguas subterráneas analizadas y el medio geológico drenado.

#### **3.4 Aplicación de los métodos de la estadística bivariada. Análisis de correlación y regresión lineal**

Los métodos de la estadística bivariada basados en el análisis de correlación y regresión lineal han sido ampliamente utilizados en el tratamiento de datos hidroquímicos, para determinar las relaciones funcionales entre las variables, **M. Machkova (1993); J. Güerón (1993)**, para corroborar hipótesis relacionadas con los procesos de interacción agua roca y de salinización de las aguas por intrusión marina, a pesar de sus limitaciones. **T. Leonarte (2005)**.

Estos métodos se utilizan para sustentar la hipótesis planteada sobre el modo en que evoluciona la composición química de las aguas en los diferentes grupos y para corroborar la coherencia interna de estos, basada en sus patrones hidrogeoquímicos y litologías drenadas. En este análisis se consideran los iones que se originan en los procesos de intemperismo de las rocas constitutivas de las formaciones geológicas presentes en el área de estudio, la dureza de las aguas ( $\text{CaCO}_3$ ) y el total de minerales adquiridos en dicho proceso (TSS).

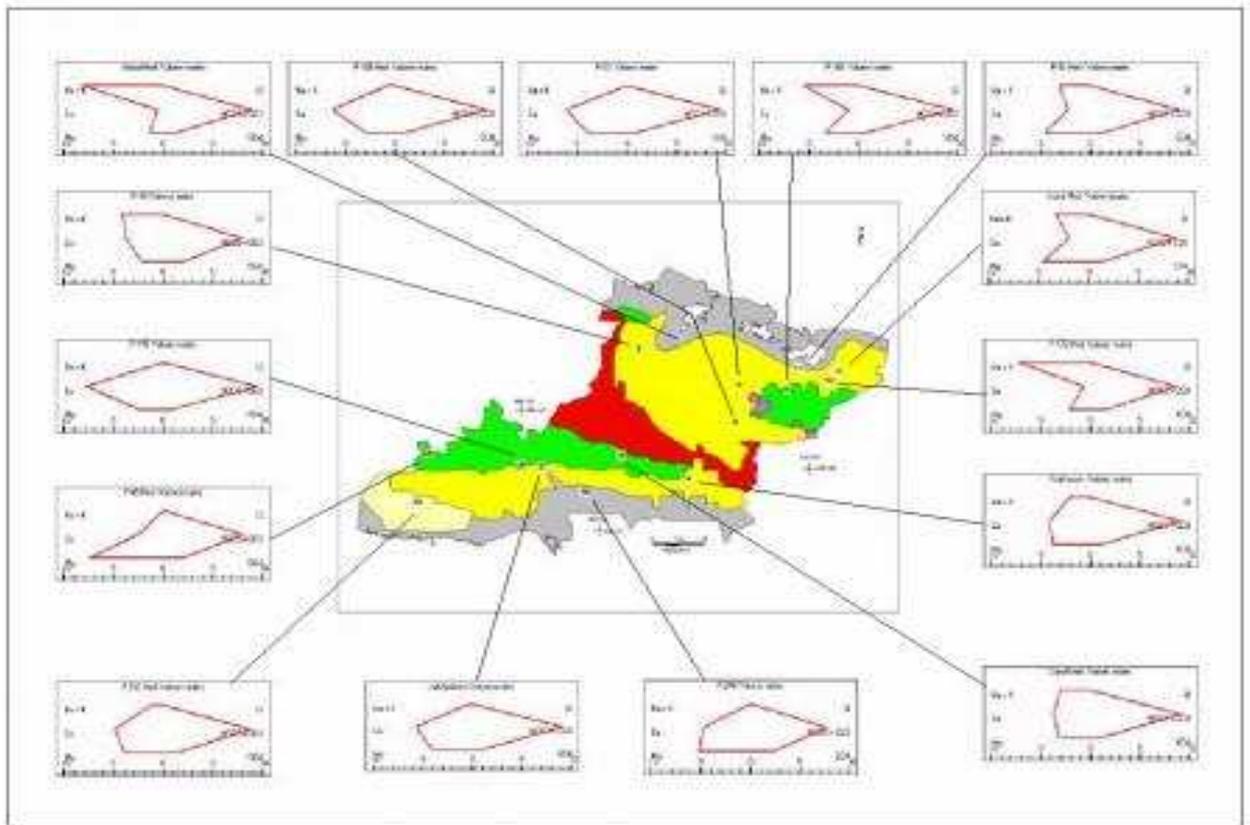


Figura 3.1 c. Distribución espacial de algunos patrones hidrogeoquímicos representativos y su relación con el medio geológico drenado.

Los iones asociados a los procesos de disolución de minerales solubles por las aguas subterráneas someras en terrenos carbonatados son:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , mientras que en los procesos de intrusión salina o salinización, debido al movimiento del agua por un terreno salino, los iones predominantes en su composición química, pueden ser  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ .

En el proceso de intemperismo de plagioclasas, ricas en mineral albita, los iones fundamentales son el  $\text{Na}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$ , mientras que el intemperismo de serpentinitas y otros minerales constitutivos de las rocas básicas y ultrabásicas genera  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$ . En las aguas subterráneas procedentes del drenaje profundo se incorporan al contenido global los iones  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-$ . El ion  $\text{SO}_4^{2-}$  en las aguas puede deberse a la disolución de minerales evaporíticos, yeso o anhidrita (aunque este no es el caso de las aguas de Las Tunas), o a los procesos de oxidación de pirita, mineral muy distribuido en la naturaleza.

Para determinar si las variables hidroquímicas presentan correlaciones significativas entre sí, debe cumplirse la premisa de que el valor de la t crítica debe ser superior a la t de Student para un nivel de probabilidad. Así la correlación es altamente significativa si  $t > t_{0,995}$  y significativa, si  $t > t_{0,95}$ . La t crítica se calcula mediante la expresión. **L. Ponce (1980)**.

$$t = \frac{r\sqrt{N-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

En la que: N es el número de muestras y r el coeficiente de correlación.

Despejando r en la expresión anterior, se determina el valor mínimo que debe tener el coeficiente de correlación para considerar su grado de significación:

$$r = \sqrt{\frac{t^2}{t^2 + (N-2)}}$$

En las **tablas 3.6 a**, se presenta la matriz de correlación de las variables hidroquímicas del grupo I de agua determinados en Las Tunas; en el cual, las correlaciones son significativas, pues el número de datos  $N = 564$  y el coeficiente de

correlación  $r > 0.110$  (**tabla 3.6 a**). Las correlaciones significativas ( $r > 0.60$ ) se obtienen entre  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{Cl}^-/\text{Mg}^{2+}$ ;  $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+\text{+K}^+$ ;  $\text{CaCO}_3/\text{TSS}$  y la correlación menos significativa respecto a TSS se obtiene con el  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Estos resultados indican que en los procesos de intemperismo de las rocas drenadas por este grupo de agua se produce principalmente, disolución de halita ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ), disolución incongruente de un aluminosilicato sódico como la albita ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{CaCO}_3$ ), disolución congruente de calcita ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) y dolomita ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{CaCO}_3$ ), y en menor proporción, oxidación de pirita ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Son también significativas las correlaciones:  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{HCO}_3^-/\text{Mg}^{2+}$ ;  $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ ;  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$ ;  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ , las cuales sustentan también los resultados anteriores.

En general se puede inferir que en el modo de adquisición de la composición química de este tipo de agua intervienen procesos de interacción agua-roca y de salinidad, ya sea por los aportes del suelo o por intrusión marina.

**Tabla 3.6 a. Matriz de correlación de variables hidroquímicas. Grupo I**

N =564	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+\text{+K}^+$	$\text{CaCO}_3$	TSS
$\text{HCO}_3^-$	1	0.46	0.26	0.68	0.54	0.67	0.76	0.89
$\text{Cl}^-$		1	0.55	0.34	0.64	0.83	0.62	0.81
$\text{SO}_4^{2-}$			1	0.16	0.47	0.53	0.41	0.52
$\text{Ca}^{2+}$				1	0.26	0.27	0.77	0.61
$\text{Mg}^{2+}$					1	0.43	0.82	0.67
$\text{Na}^+\text{+K}^+$						1	0.45	0.88
$\text{CaCO}_3$							1	0.81
TSS								1

En la **tabla 3.6 b**, se presenta la matriz de correlación de las variables hidroquímicas correspondiente al grupo de aguas II, donde el número de datos  $N = 366$ . Se observa que son significativas las correlaciones con un coeficiente  $r > 0.136$ . Las correlaciones significativas con respecto al TSS ( $r > 0.60$ ) se obtienen con todas las restantes variables, lo que indica que en el proceso de intemperismo de las aguas de este grupo, se obtiene un resultado similar al del grupo anterior (disolución de halita, albita, calcita, dolomita y pirita). Las correlaciones entre los iones:  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{HCO}_3^-/\text{Mg}^{2+}$ ;  $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ ;  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$ ;  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ , son también similares a las del grupo anterior.

**Tabla 3.6 b. Matriz de correlación de variables hidroquímicas. Grupo II**

N =366	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	CaCO <sub>3</sub>	TSS
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1	0.69	0.77	0.86	0.69	0.89	0.87	0.98
Cl <sup>-</sup>		1	0.55	0.46	0.57	0.88	0.53	0.80
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>			1	0.73	0.61	0.74	0.77	0.82
Ca <sup>2+</sup>				1	0.61	0.61	0.93	0.82
Mg <sup>2+</sup>					1	0.54	0.79	0.70
Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>						1	0.64	0.94
CaCO <sub>3</sub>							1	0.84
TSS								1

En la **tabla 3.6 c**, se presenta la matriz de correlación de las variables hidroquímicas correspondiente al grupo de aguas III. El número de datos en este caso es N=242, y son significativas las correlaciones con un coeficiente  $r > 0.166$ . Las correlaciones significativas con respecto al TSS ( $r > 0.60$ ) se obtienen con todos los iones, excepto Ca<sup>2+</sup>, donde  $r = -0.15$  y Mg<sup>2+</sup>, donde  $r = 0,07$ . Estos resultados indican que que estas aguas evolucionan principalmente, disolviendo halita (Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>), albita (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, CaCO<sub>3</sub>), serpentinita (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, CaCO<sub>3</sub>) y mediante oxidación de piritita (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>). Las correlaciones significativas tienen lugar entre HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Na<sup>+</sup> y entre el Cl<sup>-</sup>/Na<sup>+</sup>.

Del análisis de estos resultados se infiere que el proceso de intemperismo de las plagioclasas sódicas, constituidas principalmente por el mineral albita (la anortita es despreciable por la pobre correlación del Ca<sup>2+</sup> con el TSS), juega un importante papel en el modo en que el agua de este grupo adquiere su composición química.

**Tabla 3.6 c. Matriz de correlación de variables hidroquímicas. Grupo III**

N =242	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	CaCO <sub>3</sub>	TSS
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1	0.59	0.44	-0.18	-0.05	0.89	-0.11	0.93
Cl <sup>-</sup>		1	0.47	0.02	0.31	9.79	0.24	0.83
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>			1	-0.22	0.04	0.60	-0.08	0.60
Ca <sup>2+</sup>				1	0.52	-0.34	0.82	-0.15
Mg <sup>2+</sup>					1	-0.14	0.89	0.07
Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>						1	-0.24	0.97
CaCO <sub>3</sub>							1	-0.01
TSS								1

En la **tabla 3.6 d**, se muestra la matriz de correlación de las variables correspondientes al grupo de aguas IV. El número de datos en este caso es N = 25 y son significativas las correlaciones con un coeficiente  $r > 0.503$ . Las correlaciones significativas con respecto al TSS ( $r > 0.60$ ) se obtienen con todos los iones, excepto

con el  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{SO}_4^{2-}$ . Las correlaciones significativas son:  $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ ;  $\text{HCO}_3^-/\text{CaCO}_3$ ;  $\text{Mg}^{2+}/\text{CaCO}_3$ ;  $\text{Ca}^{2+}/\text{CaCO}_3$ ;  $\text{Cl}^-/\text{Mg}^{2+}$ ;  $\text{Cl}^-/\text{CaCO}_3$ .

La matriz de correlación (**tabla 3.6.d**), muestra también que existe buena correlación entre  $\text{HCO}_3^-/\text{Mg}^{2+}$ ;  $\text{HCO}_3^-/\text{Mg}^{2+}$ ;  $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ , lo cual indica que los procesos de intemperismo de albita y serpentinita son soportados por los resultados de la correlación.

**Tabla 3.6 d. Matriz de correlación de variables hidroquímicas. Grupo IV**

N =25	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	$\text{CaCO}_3$	TSS
$\text{HCO}_3^-$	1	0.55	0.32	0.95	0.77	0.81	0.90	1.00
$\text{Cl}^-$		1	0.18	0.46	0.81	0.40	0.73	0.58
$\text{SO}_4^{2-}$			1	0.34	0.17	0.33	0.34	0.34
$\text{Ca}^{2+}$				1	0.72	0.63	0.87	0.94
$\text{Mg}^{2+}$					1	0.43	0.94	0.78
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$						1	0.54	0.82
$\text{CaCO}_3$							1	0.91
TSS								1

En las **figuras 3.3 a, b, c, d**, se ilustran en forma gráfica las relaciones entre los iones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y los TSS. Las ecuaciones de regresión lineal y los coeficientes de correlación correspondientes se aprecian en la parte superior de las figuras. A partir de estas ecuaciones se puede estimar la concentración en meq/L que aporta cada ion a la mineralización total expresada en mg/L. En la **tabla 3.7** se presentan las concentraciones en meq/L que debe aportar cada grupo de agua por cada 500 mg/L de minerales totales disueltos, acorde a las estimaciones de las ecuaciones de las líneas de regresión que se reportan en las **figuras 3.3 a, b, c, d**.

De los resultados que se muestran en la **tabla 3.7** se infiere que las aguas del grupo I son las que más disuelven  $\text{Ca}^{2+}$ , seguidas de las de los grupos II y IV, que drenan, principalmente, calizas y otros minerales carbonatados, mientras que las aguas del grupo III tienden a precipitar este ion. Con respecto al  $\text{Mg}^{2+}$ , las aguas que mayor aporte hacen son las de los grupos III y IV, cuya fuente de magnesio proviene de las serpentinitas.

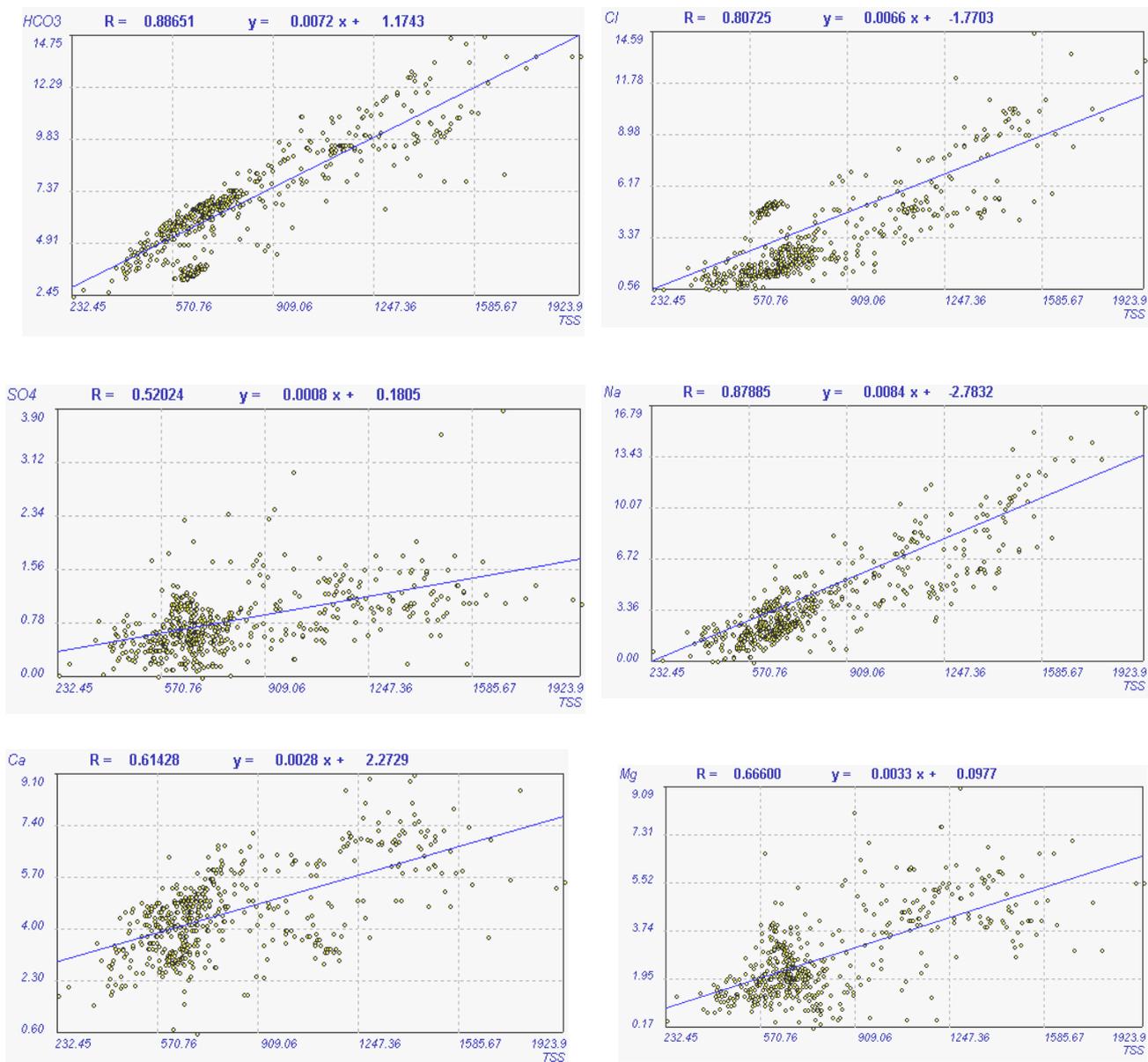


Figura 3.3 a. Correlaciones entre SST y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>. Grupo I de aguas.

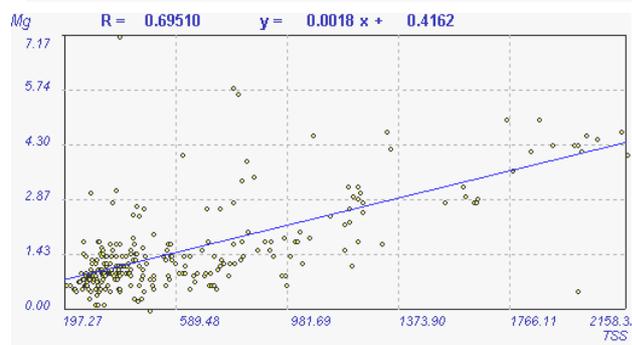
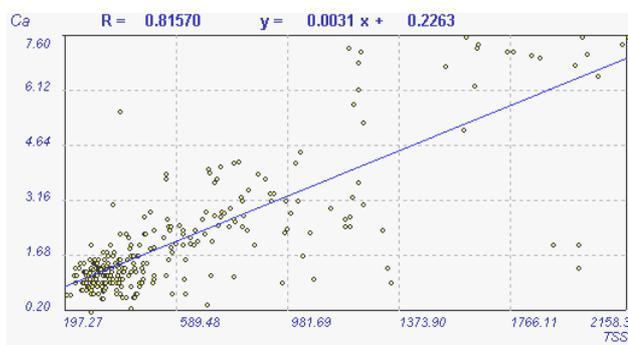
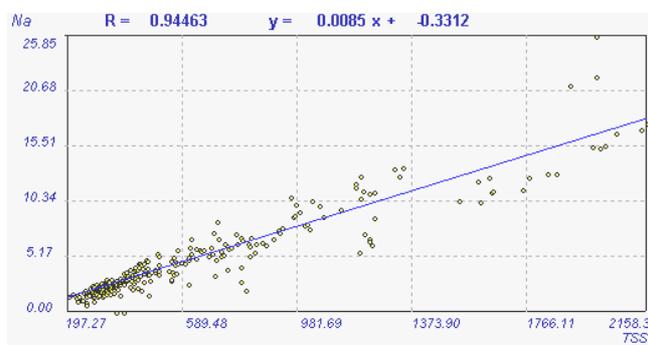
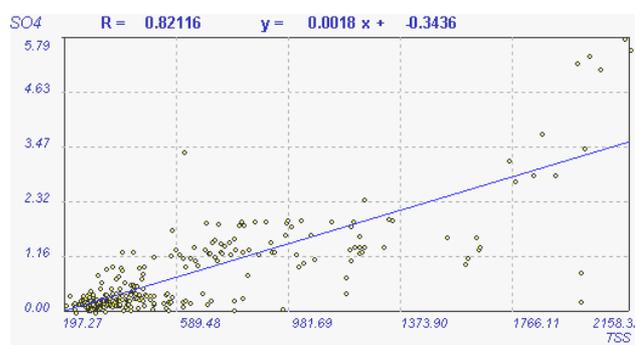
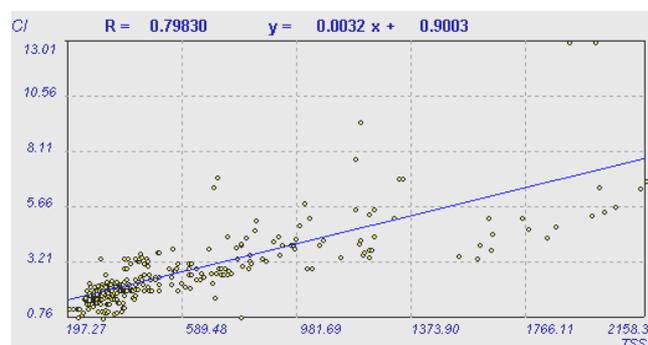
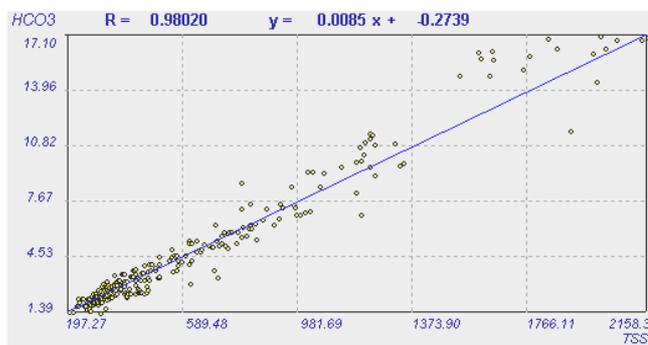


Figura 3.3 b. Correlaciones entre SST y  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Grupo II de aguas.

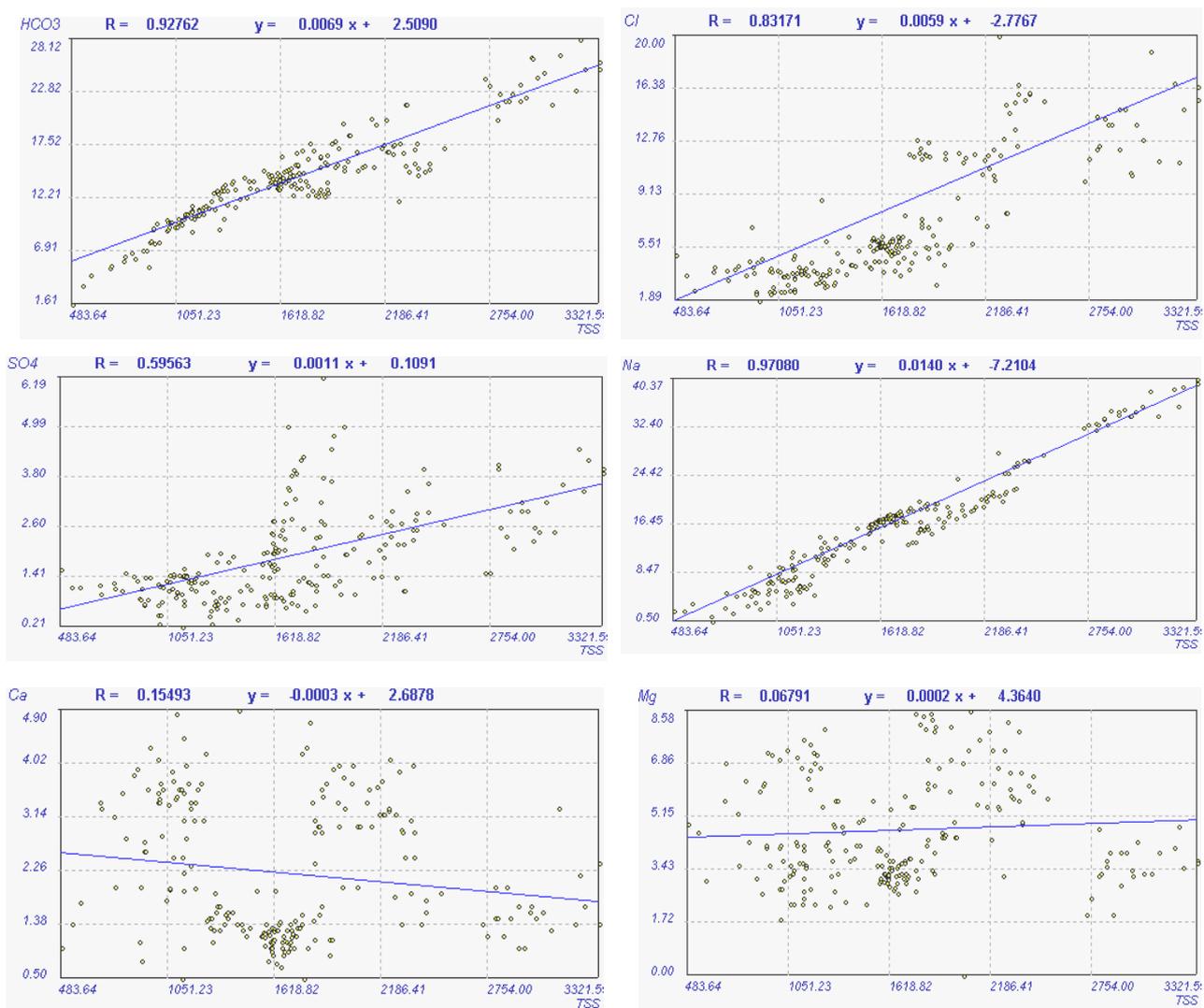


Figura 3.3 c. Correlaciones entre SST y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>. Grupo III de aguas.

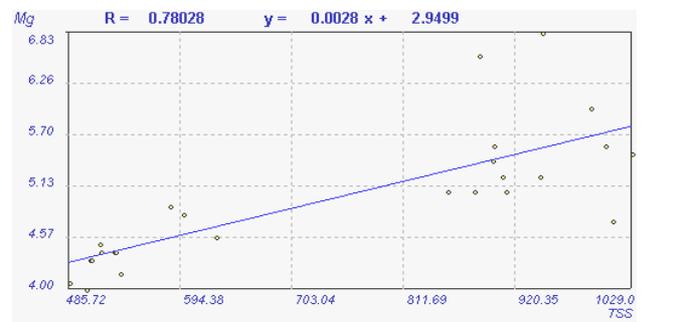
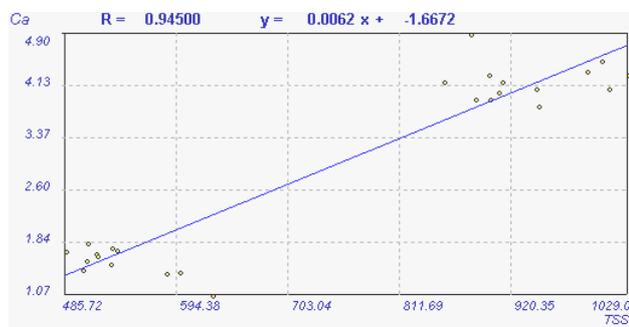
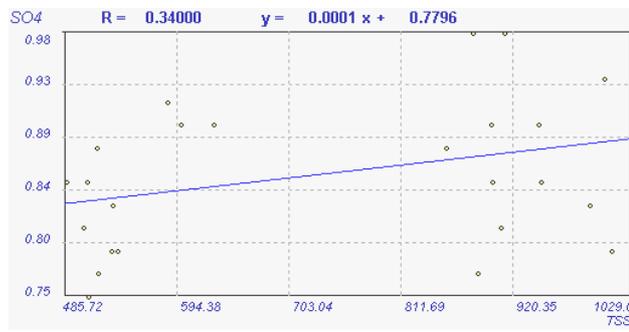
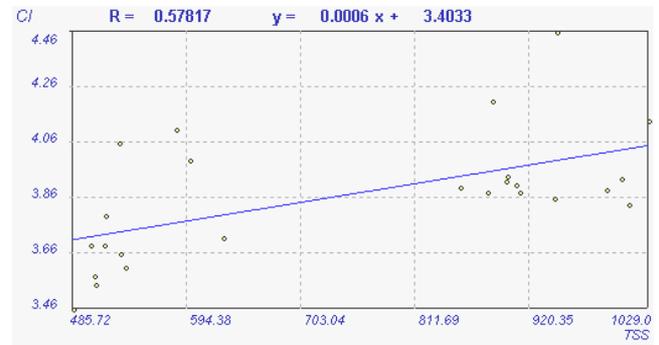
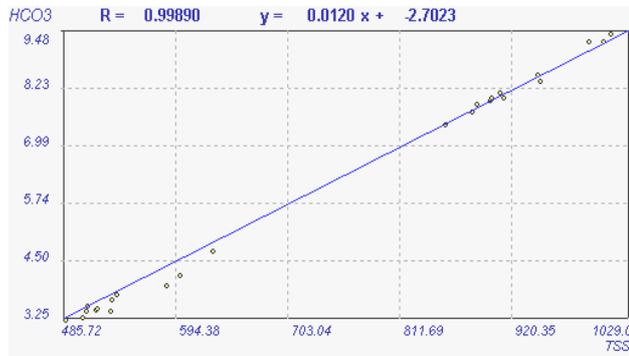


Figura 3.3 d. Correlaciones entre SST y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup>. Grupo IV de aguas.

El ion  $\text{Cl}^-$  es mayormente aportado por las aguas del grupo I, seguidas de las de los grupos II y IV, lo que presumiblemente se debe al contenido de halita de los suelos, donde sobreyacen las formaciones que drenan estas aguas o a procesos de intrusión marina. El ion  $\text{Na}^+$  estimado por las ecuaciones de regresión, aportado tanto por la halita como por la arenisca aparece en mayor abundancia en las aguas de los grupos II y III, al igual que el  $\text{SO}_4^{2-}$ , asociado este último a la oxidación de las piritas. En los resultados se observa que las aguas de los grupos I, II y IV presentan mayor concentración de cloruro de sodio, lo que no siempre está en correspondencia con la litología drenada. Por esa razón fue necesario profundizar en los análisis químicos de suelo, para explicar la procedencia de los iones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ .

**Tabla 3.7. Concentraciones en meq/L que debe aportar cada grupo de agua por cada 500 mg/L de minerales totales disueltos, acorde a las estimaciones de las ecuaciones de las correspondientes líneas de regresión (ver ecuaciones en las figuras 3.3.a – 3.3.d)**

Grupo de agua	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$
I	4.19	2.41	0.49	2.81	2.54	1.65
II	4.11	2.05	0.73	4.08	1.66	1.11
III	4.70	1.51	0.65	3.39	-0.16	2.28
IV	4.65	2.00	0.44	1.95	2.27	5.47

### 3.5 Análisis químicos de suelos

Muchas de las aguas superficiales y subterráneas utilizadas en las actividades socioeconómicas en Las Tunas, presentan elevados contenidos de sales disueltas como resultado de los procesos de lixiviación de los suelos, las propiedades geológicas de los terrenos y la mezcla con agua de mar en los acuíferos próximos a los litorales. Estas aguas experimentan cambios significativos en las propiedades químico-físicas, por el efecto del régimen de lluvia, de la sobreexplotación a que son sometidos, del mal manejo y control de su calidad y por desconocimiento de los procesos asociados al medio.

En Las Tunas las áreas más afectadas por el fenómeno de salinización coinciden con las franjas costeras, en las que se destacan extensas ciénagas, con una

influencia muy marcada del mar hasta una distancia de 15 km. El sector norte es el que abarca las mayores extensiones (57 428,01 ha), seguido por el sector Sur (35 094,16 ha), donde existen algunos saladares como el monte Cabaniguán. Este sector, a pesar de tener una costa más baja y pantanosa cuenta con una franja de salinización más estrecha que el sector norte, porque el relieve se incrementa en altitud hacia el interior, rápidamente.

En la **tabla 3.8 (Anexo IV)** se presentan los resultados del experimento de lavado de suelo con agua destilada, donde se muestra la distribución de las sales desde el perfil del suelo hasta las aguas subterráneas; se observa que el municipio con mayores concentraciones de cloruro de sodio en el suelo es Puerto Padre, donde la concentración del ion  $\text{Na}^+$  varía desde 16,24 en el horizonte A hasta 25,00 meq/100g en el horizonte C, mientras que la del ion  $\text{Cl}^-$  oscila entre 25,35 y 28,29 meq/100g desde el horizonte A hasta el C.

Los experimentos de lavado de suelo de la provincia Las Tunas con agua destilada, demuestran que las aguas meteóricas que se infiltran por los mismos, llegan a adquirir hasta un 80,7 % de cloruros y un 57,0 % de sodio en los primeros 25 cm de profundidad.

En las **tablas 3.9 a (Anexo V) y 3.9 b (Anexo VI)**, se observa un predominio de la acumulación sódica y clórica, que es significativa en los municipios Puerto Padre, Manatí, Majibacoa, Amancio y Jobabo. Estos resultados corroboran que el aporte adicional del NaCl a la composición química de las aguas de los grupos I, II y IV, correspondientes a fuentes ubicadas en sector Norte y Sur de Las Tunas, procede del suelo, lo que es coherente con los resultados obtenidos para los municipios Puerto Padre, Menéndez, Manatí, Jobabo, Majibacoa, Colombia y Amancio, como consecuencia del proceso de lixiviación a que son sometidos estos durante las precipitaciones, aunque se considera la incidencia de la intrusión marina .

En las zonas donde existen sedimentos arcillosos de edades geológicas del Mioceno o Cuaternario, las arcillas contienen sales de origen marino (halitas, yeso, sodas y otras), que son solubles en agua y algunas especies de estas sales llegan a la

superficie del suelo por ascenso capilar de las arcillas, el agua se evapora y las sales se depositan para salinizar los suelos. En el sector sur de Las Tunas el municipio con mayor afectación es Amancio. La concentración de  $\text{Na}^+$  varía desde 0,66 hasta 4,66 meq/100g y la del  $\text{Cl}^-$  entre 0,61 y 4,06 meq/100g, seguido del municipio Jobabo que tiene una concentración del  $\text{Na}^+$  que varía desde 1,60 hasta 3,78 meq/100g, mientras que el  $\text{Cl}^-$  lo hace desde 1,13 hasta 1,57 meq/100g.

Las precipitaciones son el principal factor del escurrimiento y con los factores geológicos, el suelo, el relieve, la vegetación y los antropogénicos, le imprimen a la localidad diversidad y complejidad en los regímenes hidrológicos. En estos resultados ha influido la cantidad de precipitaciones ocurridas en los últimos años, **tabla 3.9 a (Anexo V)**, caracterizadas por períodos de sequías prolongadas con lluvias muy inferiores al promedio histórico para la provincia (1 038 mm) y al promedio nacional (1 335 mm). **INRH (2006)**.

La variación del régimen de lluvia influye en la composición química del agua, debiéndose esperar una mayor dilución con las precipitaciones, y por tanto en los períodos húmedos. Si bien en las aguas superficiales (presas) y en la mayoría de los pozos muestreados en Las Tunas se observa un valor medio del TSS superior en los meses húmedos al del TSS en los meses secos (**tabla 3.14**), esto no sucede así en una parte de los pozos. Esto pudiera deberse a las diferencias existentes entre el tiempo que media entre la recarga y el arribo del agua subterránea al pozo, al denominado efecto pistón, mediante el cual la lluvia provoca la salida de un agua de alta mineralización almacenada en el acuífero o a diferencias en el régimen de explotación en el mismo.

El alto contenido de cloruro de sodio observado en algunas fuentes de abasto puede estar relacionado con la intrusión marina (en los pozos cercanos al litoral) o al aporte de aguas de origen profundo a través de las fallas.

### **3.6 Relación entre patrones y procesos hidrogeoquímicos con la litología**

En el capítulo I epígrafe 1.5 se hace referencia a que la litología determina, por lo general, las facies hidroquímicas dominantes en una región determinada, es decir, el

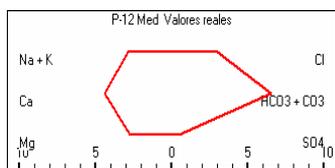
tipo de agua. Para facilitar la interpretación de la relación entre la composición química del agua y la litología drenada en Las Tunas, se analizan aquellos patrones donde se han extraído los componentes del agua de lluvia y el cloruro de sodio.

Los principales procesos geoquímicos (**tabla 3.10**) que explican el origen de la composición química de las aguas que drenan los materiales acuíferos (**tabla 2.1 a, b, c**) y las relaciones estequiométricas en que se producen estos procesos, de acuerdo con la composición mineralógica de las rocas presentes en la provincia, expresada en por ciento y en términos de patrones hidrogeoquímicos (**tabla 3.3 a, b, c**) son: disolución de halita, disolución-precipitación de calcita, disolución-precipitación de dolomita, intemperismo de plagioclasas (Feldespatos sódicos), oxidación de pirita, intemperismo de serpentinitas y otras rocas básicas y ultrabásicas, (**tabla 3.10**).

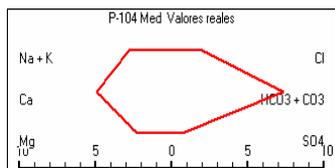
En las **figuras 3.4 a, b, c, d, e**, se presentan los patrones hidrogeoquímicos originales y extraídos de las muestras que drenan las diferentes litologías presentes en Las Tunas representados como diagramas de Stiff. Las **figuras 3.4 a**, muestran patrones originales y extraídos correspondientes a los pozos P-12, P-104, P-87, Cocal II y P-19, de la Fm. Vázquez y el P-105 de la Fm. Caobilla. Los patrones originales reflejan, un contenido relativamente alto de cloruro de sodio (desde 253-361 hasta 631-532); sin embargo, los patrones donde se ha extraído la concentración de esta sal, son propios de calizas dolomitizadas (163-181).

En los patrones correspondientes a las concentraciones máximas, el pozo P-12 mantiene el mismo patrón de las calizas dolomitizadas, los pozos P-104, P-105 y el P-19, muestran un incremento del catión sodio, mientras que el pozo P-87 exhibe un incremento del ion magnesio (**tabla 3.3 a**). Estas pequeñas diferencias en los patrones extremos de estas aguas están relacionadas con las peculiaridades litológicas locales, donde el catión sodio es aportado por las margas y las arcillas; como mineral plagioclasa, mientras que el calcio y el magnesio son aportados por las calizas dolomitizadas.

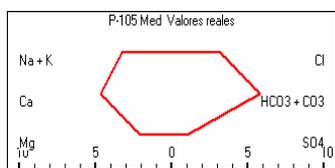
Patrones de valores reales



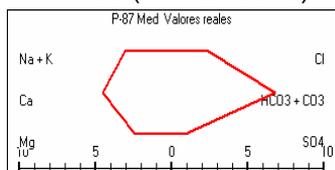
P-12 (Fm. Vázquez)



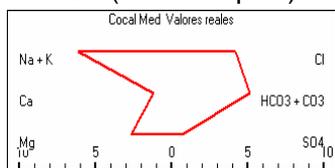
P-104 (Fm. Vázquez)



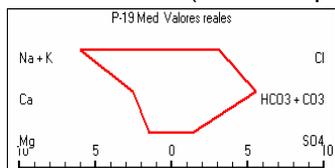
P-105 (Fm. Caobilla)



P-87 (Fm. Vázquez)



El Cocal II (Fm. Vázquez)



P-19 (Fm. Vázquez)

Patrones de ganancia iónica (extraído el NaCl)

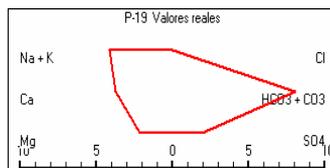
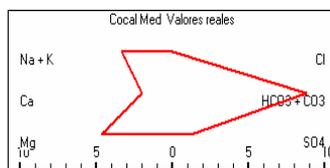
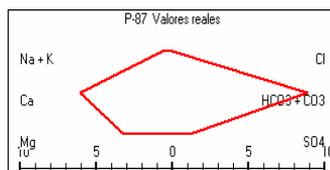
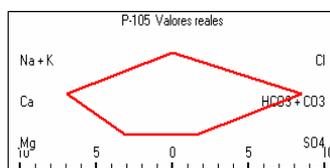
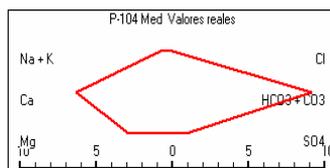
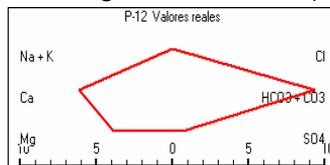
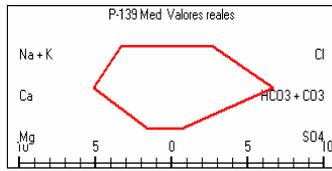
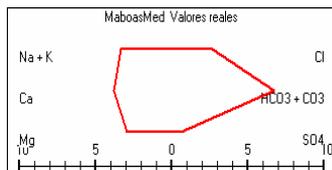


Figura 3.4.a. Patrones hidrogeoquímicos originales y a los que se le ha extraído el NaCl.

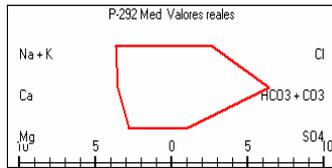
Patrones de valores reales



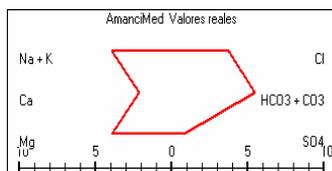
P-139 (Fm. Yayal)



Las Maboas (Fm. Güines)



P-292 (Fm. Güines)



Carretera Amancio (Fm. Arroyo Palma)

Patrones de ganancia iónica (extraído el NaCl)

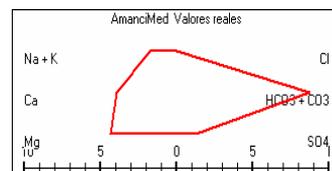
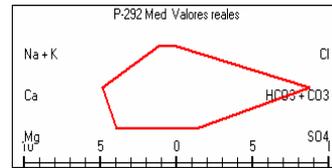
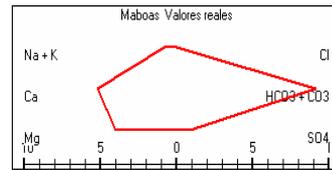
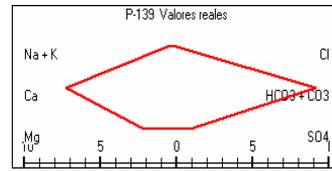
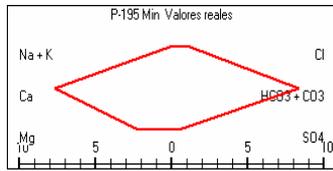


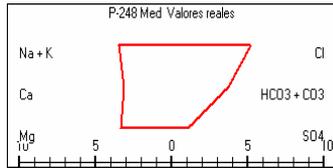
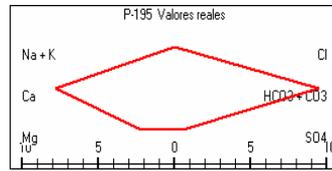
Figura 3.4.b. Patrones hidrogeoquímicos originales y a los que se le ha extraído el NaCl.

Patrones de valores reales

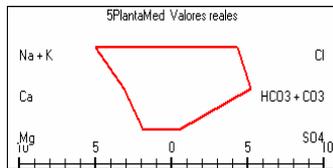
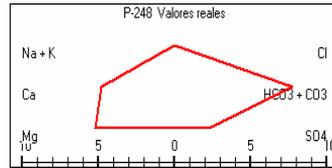
Patrones de ganancia iónica (extraído el NaCl)



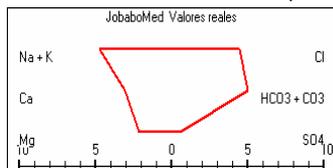
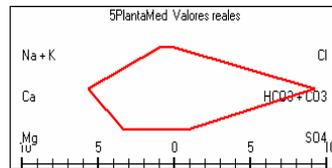
P-195 (Fm. Jimaguayú)



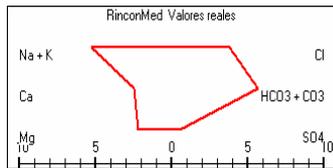
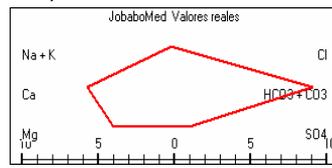
P-248 (Fm. Contra maestre)



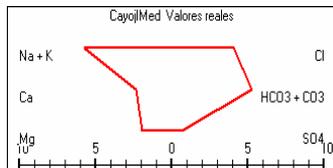
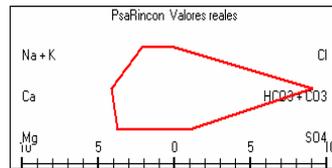
Quinta Planta (Fm. Contra maestre)



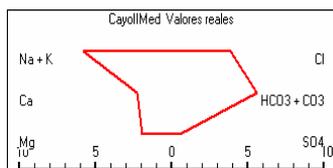
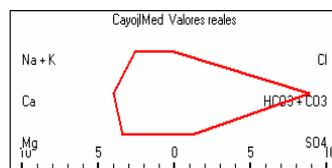
Central Jobabo (Fm. Contra maestre)



Presa Rincón (Fm. Contra maestre)



Presa Cayojo I (Fm. Contra maestre)



Presa Cayojo II (Fm. Contra maestre)

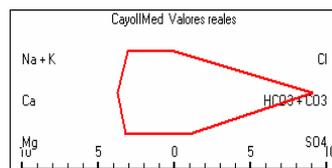
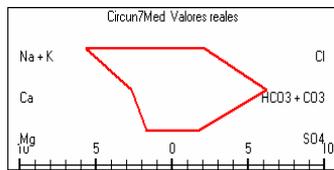
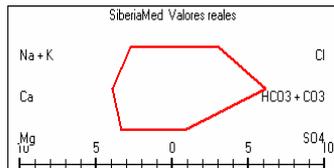
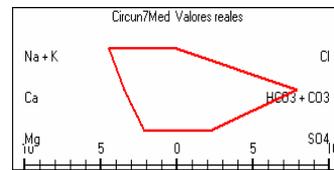


Figura 3.4.c. Patrones hidrogeoquímicos originales y a los que se le ha extraído el NaCl.

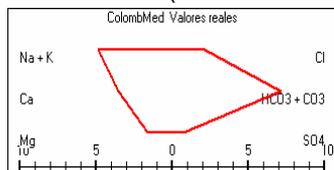
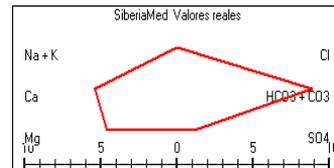
Patrones de valores reales Patrones de ganancia iónica (extraído el NaCl)



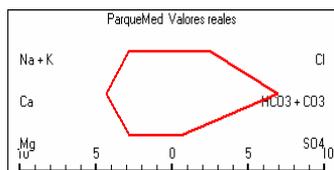
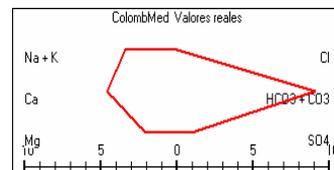
Circunscrición 7 (Fm. Guaimaro)



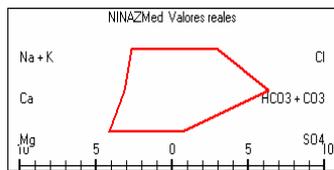
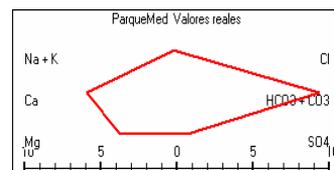
La Siberia (Fm. Guaimaro)



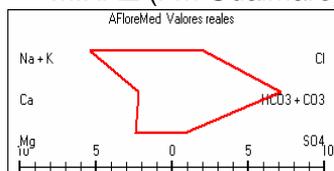
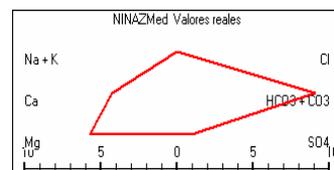
Cabecera Colombia (Fm. Guaimaro)



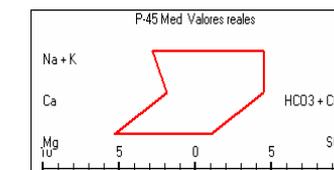
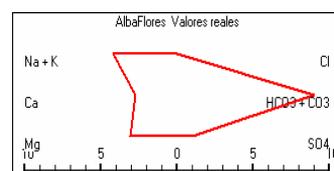
Edificio Parque (Fm. Guaimaro)



MINAZ (Fm Guaimaro)



Alba Flores (Fm. Guaimaro)



P-45 (Fm. Yaquimo)

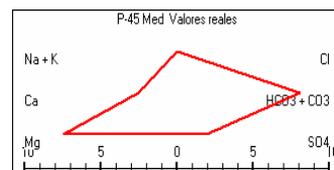
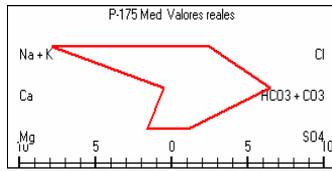


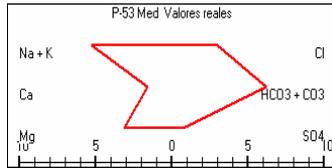
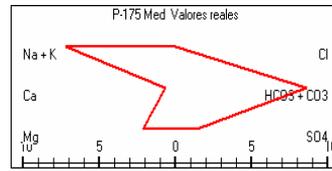
Figura 3.4.d. Patrones hidrogeoquímicos originales y a los que se le ha extraído el NaCl.

Patrones de valores reales

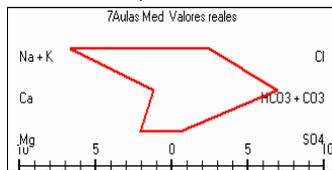
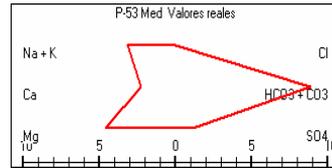
Patrones de ganancia iónica (extraído el NaCl)



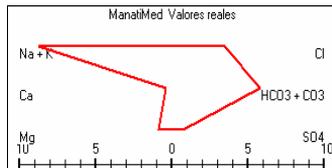
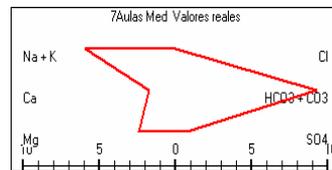
P-175 (Fm. Vázquez)



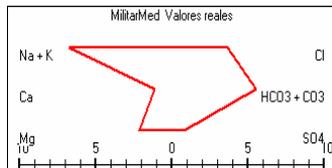
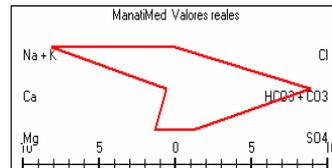
P-53 (Fm. Puerto Padre)



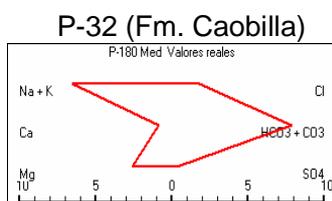
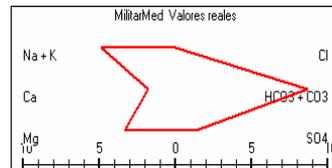
Siete Aulas (Fm. Puerto Padre)



Reparto Militar (Fm. Puerto Padre)



Acueducto Manatí (Fm. Caobilla)



P-180 (Fm. Iberia)

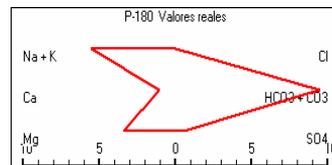


Figura 3.4.e. Patrones hidrogeoquímicos originales y a los que se le ha extraído el NaCl.

El factor de concentración del cloruro de las aguas en estos pozos, varía entre 3,53 y 69,7 con respecto al de la lluvia. Su concentración media oscila entre 626 y 831 mg/L (**tabla 3.11**). Los menores valores medios corresponden a las aguas hidrogenocarbonatadas cloruradas cálcicas sódicas magnésicas, mientras que las concentraciones máximas pertenecen a las aguas cloruradas hidrogenocarbonatadas sódicas magnésicas. Los procesos geoquímicos que explican la composición química de estas aguas (**tabla 3.10**) son similares a los que originan la composición del pozo P-195 de la Fm. Jimaguayú, aunque en diferentes proporciones, **tabla 3.10**.

En la **figura 3.4 b**, se presentan los patrones originales y extraídos del pozo P-139, perforado en la Fm. Yayal. Como se observa, los patrones originales poseen un contenido relativamente alto de cloruro de sodio (352-451 hasta 523-541) y los patrones extraídos correspondientes a las concentraciones mínimas y medias (**tabla 3.3 b**) son típicos de una caliza dolomitizada (172-181), mientras que el de la concentración máxima es similar al de una dolomita (145-181).



**Tabla 3.11. Concentración de minerales (mmol/L) formados (+) o precipitados (-) en los procesos geoquímicos. Provincia Las Tunas**

	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
	P-195			P-12			P-104		
Halita	4.12	5.06	4.12	15.24	16.71	14.06	0.429	1.499	3.81
Albita	4.12	5.06	4.12	15.24	16.71	14.06	0	0	4.14
Anorthita	4.12	5.06	4.12	15.24	16.71	14.06	0	0	0
Calcita	4.12	5.06	4.12	15.24	16.71	14.06	0.754	1.425	1.29
Dolomita	4.12	5.06	4.12	15.24	16.71	14.06	0.2	0.91	0.92
Serpentinita	4.12	5.06	4.12	15.24	16.71	14.06	0	0	0
Pirita	4.12	5.06	4.12	15.24	16.71	14.06	0.015	0.285	0.36
I Iónico (Na)	4.12	5.06	4.12	15.24	16.71	14.06	0.13	0.285	0
Fc Cl	4.12	5.06	4.12	15.24	16.71	14.06	3.53	9.82	23.53
	P-105			P-19			P-87		
Halita	1.731	2.961	6.85	1.971	3.41	3.409	1.929	1.999	1.651
Albita	0	0	3.25	0.44	3.24	7.79	0	0	3.25
Anorthita	0	0	0	0	0.292	0.701	0	0	0
Calcita	0.735	1.305	1.14	-0.07	0.298	0.354	0.235	0.927	1.545
Dolomita	0.885	1.2	1.32	0.68	0.8	0.555	0.77	1.06	0.925
Serpentinita	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pirita	0.3	0.505	1.5	0.645	0.75	0.96	0.22	0.385	1.95
I Iónico (Na)	0.72	0.6	0	0	0	0	0.19	0	0.88
Fc Cl	11.18	18.41	41.29	12.59	21.06	21.06	11.18	18.41	41.29
	Acueducto de Manatí			P-175			P-53		
Halita	9.97	13.427	16.34	3.69	5.28	5.04	2.42	4.611	19.83
Albita	22.26	21.505	23.03	8.35	11.91	14.74	0.9	3.52	8.25
Anorthita	0.66	0.64	1.16	0.685	0.545	0.535	0.08	0.317	0.885
Calcita	0	0	0	0	0	0	0.755	0.913	0
Dolomita	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Serpentinita	0.97	1.605	1.845	2.095	1.765	2.22	1.51	2.475	1.595
Pirita	0.75	1.64	2	0.985	1.155	2.41	0.585	0.605	0.7
I Iónico (Na)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fc Cl	59.65	79.59	97.12	22.71	32.06	30.65	15.24	28.12	117.65
	El Cocal II			P-139			Carretera Amancio		
Halita	11.7	11.69	11.679	1.94	2.690	8.141	2.72	5.7	14.42
Albita	2.06	5.48	9.33	0	0	0	0	1.81	0.49
Anorthita	0.185	0.493	0.84	0	0	0	0	0.163	0.044
Calcita	1.875	1.147	0.723	0.98	2.12	-0.975	-0.18	2.252	0.511
Dolomita	0	0	0	0.635	0.775	2.43	2.055	3.835	1.805
Serpentinita	4.22	3.765	3.635	0	0	0	0	0	0
Pirita	0.7	0.975	1.105	0.395	0.31	0.48	0.425	0.635	0.55
I Iónico (Na)	0	0	0	-0.19	-0.56	-2.11	-2.17	0	0
Fc Cl	70.24	69.76	69.7	12.41	16.82	48.88	17	34.53	85.82

**Tabla 3.11. Concentración de minerales (mmol/L) formados (+) o precipitados (-) en los procesos geoquímicos. Provincia Las Tunas (Continuación)**

	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo
	P-292			Las Maboas			7Aulas		
Halita	4.34	3.41	3.97	4.68	4.66	5.23	7.32	6.571	7.2
Albita	2.95	1.23	5.61	0	0	4.191	8.3	11.32	13.92
Anorthita	0.266	0.111	0.505	0	0	0.377	0.7	1.019	1.41
Calcita	0.57	1.119	0.27	0.55	1.325	2.97	0.71	0.956	0
Dolomita	0.97	1.835	1.385	2.385	2.625	2.385	0	0	0
Serpentinita	0	0	0	0	0	0	3.095	2.775	2.885
Pirita	0.5	0.61	0.895	0.615	0.56	0.635	0.55	0.745	0.55
I Iónico (Na)	0	0	0	-0.35	-0.56	0	0	0	0
Fc Cl	26.53	21.06	24.35	11.18	18.41	41.29	44.06	39.65	46.41
	Reparto. Militar			P-32			P-180		
Halita	8.839	11.249	12.34	14.62	15.54	15.41	3.34	2.98	3.72
Albita	8.38	9.56	9.93	10.08	10.56	12.26	7.94	8.37	9.93
Anorthita	0.754	0.86	0.894	1.21	0.91	0.910)	0.775	0.735	0.935
Calcita	1.056	0.89	1.066	0	0	0	0	0	0
Dolomita	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Serpentinita	3.43	3.255	3.26	2.845	2.945	2.845	2.42	2.305	2.68
Pirita	1.05	1.28	1.396	1.74	1.54	1.345	0.38	0.315	0.47
I Iónico (Na)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fc Cl	53	67.18	73.59	87	92.41	91.65	20.64	18.53	22.88
	Central Jobabo			Quinta Planta			P-248		
Halita	7.63	9.271	12.901	7.629	9.099	8.25	4.631	4.89	5.16
Albita	0	0	3.67	0	1.32	4.79	0	0	0
Anorthita	0	0	0.3	0	0.119	0.431	0	0	0
Calcita	0.895	1.225	-1.32	1.925	1.276	1.519	-1.68	-0.975	-0.27
Dolomita	1.93	2.24	2.76	1.93	1.945	1.51	1.825	1.595	1.325
Serpentinita	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pirita	0.405	0.55	0.54	1.05	0.48	0.48	0.39	0.51	0.505
I Iónico (Na)	-2.87	0.49	0	2.79	0	0	-2.65	-1.74	-0.76
Fc Cl	45.88	55.53	76.88	45.88	54.52	49.53	28.24	29.76	31.35
	Presa Rincón			Presa Cayojo I			Presa Cayojo II		
Halita	1.32	2.23	4.531	1.04	2.081	12.841	1.04	2.309	12.84
Albita	0.51	0.88	0.91	0.22	0.89	8.22	0.48	1.24	8.98
Anorthita	0.05	0.081	0.082	0.02	0.09	0.74	0.043	0.112	0.808
Calcita	0.254	0	-0.852	-0.04	0	-1.915	-0.063	-0.017	-1.983
Dolomita	0.26	0.665	1.93	0.305	0.51	2.135	0.305	0.595	2.135
Serpentinita	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pirita	0.02	0.17	0.395	0.075	0.18	1.45	0.175	0.165	0.425
I Iónico (Na)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fc Cl	8.76	14.12	27.65	7.12	13.24	76.53	7.12	14.59	76.53

**Tabla 3.11. Concentración de minerales (mmol/L) formados (+) o precipitados (-) en los procesos geoquímicos. Provincia Las Tunas (Continuación).**

	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Máximo	Medio	Mínimo	Medio	Máximo
	Circunscripción 7			Colombia			Edificio Parque		
Halita	5.07	5.48	6.681	5.07	3.8	4.37	3.29	3.401	3.18
Albita	6.15	9.33	10.85	7.32	4.97	6.78	0	0.46	1.63
Anorthita	0.554	0.84	0.977	0.659	0.447	0.61	0	0.04	0.237
Calcita	0.536	0.525	0.773	1.066	1.68	1.69	0.82	1.075	0.853
Dolomita	2.47	2.19	2.01	1.385	1.455	1.43	1.885	1.945	1.97
Serpentinita	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pirita	1.615	2.235	2.78	0.8	0.675	0.7	0.28	0.36	0.450 ()
I Iónico (Na)	0	0	0	0	0	0	-0.51	0	0
Fc Cl	30.82	33.24	40.29	30.82	23.35	26.71	20.35	21	19.71
	La Siberia			Alba Flores			MINAZ		
Halita	2.751	3.401	3.18	2.339	2.75	3.55	3.72	3.81	3.97
Albita	4.73	0.46	1.63	3.13	4.73	7.78	0	0	0
Anorthita	0.56	0.04	0.237	1.26	1.515	0.95	0	0	0
Calcita	-0.576	1.075	0.853	0	0	0	1.575	1.835	2.37
Dolomita	1.665	1.945	1.97	0	0	0	0	0	0
Serpentinita	0 (0)	0	0	2.055	1.665	1.135	2.51	2.74	2.72
Pirita	0.56	0.36	0.45	0.375	0.56	0.7	0.44	0.44	0.45
I Iónico (Na)	0	0	0	0	0	0	-0.97	-0.46	0.52
Fc Cl	17.18	21	19.71	14.76	17.18	21.88	22.94	23.41	24.35

	Mínimo	Medio	Máximo
	P-45		
Halita	3.29	3.57	3.41
Albita	0	0	0
Anorthita	0	0	0
Calcita	-0.055	0	-0.09
Dolomita	0	0	0
Serpentinita	2.01	2.18	2.135
Pirita	0.425	0.42	0.425
I Iónico (Na)	-1.75	-1.49	-1.68
Fc Cl	44.06	39.65	46.41

La composición química determina que estas varían desde hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas cálcicas magnésicas hasta cloruradas hidrogenocarbonatadas sódica cálcicas magnésicas. La mineralización es de 4,82 en su valor mínimo, 800 en su valor medio y 1 132 mg/L en el valor máximo. El factor de concentración del cloruro respecto al agua de lluvia varía entre 12,41 y 48,88. Los procesos geoquímicos que originan la composición química de estas aguas son similares a las de los pozos que drenan las formaciones Jimaguayú y Vázquez de composición litológica parecida (**tabla 3.10**).

En la **figura 3.4 b**, se presentan los patrones originales y extraídos del pozo P-Carretera de Amancio, representativos de la Fm. Arroyo Palma. Se observa que las aguas se caracterizan por un incremento apreciable de cloruro de sodio (patrones desde 154-361 hasta 721-631), y que los patrones extraídos son muy similares: 154-145 y 145-181 (**tabla 3.3 b**), típicos de una caliza dolomitizada y una dolomita, respectivamente. Por su composición química las aguas varían desde hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas magnésicas hasta cloruradas hidrogenocarbonatadas sódicas cálcicas, donde la mineralización tiene 751 mg/L como valor mínimo, 1 553 mg/L en el valor medio y 1 657 mg/L como valor máximo.

El factor de concentración del cloruro respecto al agua de lluvia varía desde 17,00 hasta 85, 82 (tabla 3.11). El TSS son del orden de 1 553 mg/L y varían entre 751 y 1 657 mg/L. Los procesos geoquímicos que originan la composición química de esta agua, son similares a los que originan la de los pozos que drenan calizas, arcillas y margas anteriormente estudiadas (**tabla 3.10**).

En la **figura 3.4 b** se presentan los patrones originales y extraídos de los pozos P-292 y el P-Las Maboas, representativos de la Fm. Güines; se observa que los patrones originales varían desde 253-361 hasta 631-631, y los patrones extraídos desde 154-181 hasta 532-181 (**tabla 3.3 b**), característicos de aguas hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas cálcicas magnésicas. El factor de concentración del cloruro respecto al agua de lluvia varía desde 11,18 hasta 41,29 (**tabla 3.11**) y la mineralización está entre 787 y 1 411 mg/L en los valores mínimos y máximos respectivamente, mientras que en sus valores medios varía desde 953 hasta 1 173 mg/L. Los procesos geoquímicos que justifican la composición química

de estas aguas son similares a los de las anteriores formaciones geológicas estudiadas, constituidas por calizas, arcillas y margas (**tabla 3.10**).

En la **figura. 3.4 c y en la tabla 3.3.c**, se aprecia que, tanto los patrones originales como los extraídos del pozo P-195, perforado en la Fm. Jimaguayú, son similares; presentan muy poco contenido de cloruro de sodio y en las concentraciones mínimas son del tipo 181-181, mientras que en las concentraciones medias y máximas son del tipo 172-181 (**tabla 3.3 c**). Estos patrones se corresponden con los de una caliza relativamente pura (patrón hidrogeológico del grupo de aguas I), y son coherentes con la composición litológica de la formación, en el que el componente principal es la caliza biógena.

El factor de concentración del cloruro del agua con respecto al de la lluvia, varía entre 4,12 y 5,06, siendo su mineralización media de 533 mg/L. La composición química de esta agua, del tipo hidrogenocarbonatada cálcica se explica mediante procesos de disolución de halita, calcita, dolomita, oxidación de pirita e intercambio iónico en las proporciones que se aprecian en la **tabla 3.10**.

En la **figura. 3.4 c**, se muestran los patrones originales y extraídos en los acuíferos de la Fm. Contramaestre (pozos P-Central Jobabo, P-Quinta Planta, P-248, Presa Rincón y Presa Cayojo); en esta última se hicieron muestreos en dos sitios, denominados Cayojo I y II. Los patrones originales presentan una variación desde 352-451 hasta 712-541. Una vez extraído el cloruro de sodio, varían desde 145-181 hasta 523-172 y 136-181 (**tabla 3.3 c**).

Las variaciones reflejan, en unos casos, la presencia de areniscas y tobas; en otro la de rocas con abundante magnesio (rocas volcánicas o calizas dolomitizadas), lo que está en correspondencia con la compleja composición litológica de esta formación, ya que se observa un aporte significativo de calizas dolomitizadas y de tobas. Estos patrones determinan que las aguas que drenan esta formación, respecto a su composición química, presenten una tendencia general que se manifiesta desde aguas hidrogenocarbonatadas cloruradas cálcico sódicas magnésicas, pasando por hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas cálcicas magnésicas, hasta hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas.

El factor de concentración del ion cloruro respecto al agua de lluvia oscila desde 7,12 hasta 76,88 (**tabla 3.11**), lo que demuestra que se produce una variación significativa en la composición química de las aguas en la zona estudiada. El TSS cambia desde 196 mg/L, en las aguas de presas, hasta 1 924 mg/L en los pozos analizados. Esto demuestra la elevada mineralización adquirida por las aguas a través del proceso de interacción con las rocas de la corteza terrestre. Los valores medios del TSS oscilan entre 385 mg/L y 1481 mg/L, correspondiendo las mínimas concentraciones a las aguas de presas.

Los procesos geoquímicos principales, mediante los cuales se explica el origen de la composición química de las aguas en la zona estudiada son: disolución de halita, intemperismo de plagioclasas y oxidación de la pirita (**tabla 3.10**). Teniendo en consideración que la relación calcio/magnesio es 6:3, en una parte de los pozos y presas, se asume la presencia de disolución de calcita y dolomita como un aporte extra, especialmente en las concentraciones medias y máximas de los puntos donde se realizó el muestreo.

En la **figura 3.4 d**, se presentan los patrones originales y los extraídos de las aguas que drenan la Fm. Guáimaro, (pozos P-Circunscripción 7, P-La Siberia, P-Cabecera de Colombia, P-Edificio del Parque, P-MINAZ y P-Alba Flores). Los patrones originales varían desde 532-271 hasta 712-361, mientras que los extraídos se comportan desde 163-181 hasta 712-181 en el primer grupo, que tiene menor contenido de magnesio; y para el segundo, donde el contenido de magnesio es mayor, oscila entre 145-181 y 712-181 (**tabla 3.3 c**), donde se observa que en uno el calcio es mayor que el magnesio y en el otro este es mayor que el calcio.

En el primer grupo, las aguas varían desde hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas cálcicas magnésicas hasta hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas cálcicas y en el segundo, desde hidrogenocarbonatadas cloruradas magnésicas cálcicas hasta hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas magnésicas cálcicas. El factor de concentración del ion cloruro respecto al agua de lluvia oscila entre 14,76 y 40,26 (**tabla 3.11**), los TSS varían significativamente desde 699 hasta 2 156 mg/L en los mínimos y máximos, mientras que en las medias oscilan desde 933 hasta 1 968 mg/L, lo que indica una elevada mineralización de las aguas analizadas.

Los principales procesos geoquímicos que explican la composición química de esta agua son: disolución incongruente de plagioclasas, disolución congruente de calcita y dolomita, en unos casos, e intemperismo de serpentinita en otro; así como oxidación de pirita (**tabla 3.10**).

En la **figura 3.4 d**, se representan los patrones originales y los extraídos de las aguas que se mueven en la Fm. Yáquimo, el pozo-45. Los patrones originales varían desde 325-451 hasta 324-541, los extraídos poseen un patrón similar, 127-172 (**tabla 3.3 c**), siendo este comportamiento típico de una serpentinita. La composición química del agua varía muy poco, desde cloruradas hidrogenocarbonatadas magnésicas sódicas hasta cloruradas hidrogenocarbonatadas sódicas magnésicas.

El factor de concentración del ion cloruro respecto al agua de lluvia varía desde 39,65 hasta 46,41, mientras que los TSS son relativamente bajos, con un valor medio de 462 mg/L y una variación de 418 y 542 mg/L en los mínimos y máximos. Los procesos geoquímicos que justifican la composición química de esta agua son la disolución de halita y el intemperismo de las serpentinitas (**tabla 3.10**).

En la **figura 3.4 e**, se muestran los patrones originales y los extraídos de las aguas que drenan los pozos de la Fm. Puerto Padre (pozos P-Siete Aulas y P-Reparto Militar). Los patrones originales reflejan un elevado contenido de hidrogenocarbonato y de cloruro de sodio, estos varían desde 613-361 hasta 712-451, mientras que en los patrones extraídos oscila entre 523-181 y 712-181 (**tabla 3.3 a**), lo que evidencia una pequeña disminución en la concentración del cloruro y que la relación calcio/magnesio favorece más la concentración de magnesio que la de calcio, debido a la presencia de serpentinitas. En correspondencia con estos patrones se determinó que las aguas, de acuerdo con su composición química, varían desde hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas magnésicas, hasta hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas.

En los análisis realizados se aprecia que el factor de concentración del ion cloruro respecto al agua de lluvia varía desde 39,65 hasta 73,59. Por otra parte, los TSS cambian desde 1 816 mg/L hasta 2 339 mg/L en los valores mínimos y máximos, mientras que los valores medios oscilan entre 2 009 hasta 2 211 mg/L. Los procesos

geoquímicos que originan la composición química de estas aguas son la disolución de halita, albita, serpentinita y la oxidación de la pirita (**tabla 3.10**).

En la **figura. 3.4 e**, se presenta el patrón original y el extraído de las aguas subterráneas que se mueven en el acuífero desarrollado en la Fm. Caobilla (P-32). En el análisis realizado se ha constatado que ambos patrones, originales y extraídos, reflejan cierta uniformidad; su variación es desde 712-541 hasta 712-451 (**tabla 3.3 c**). Al extraer el cloruro de sodio se observa poco cambio, lo que se refleja en la variación de los patrones originales desde 523-172 hasta 613-181. Los patrones obtenidos son coherentes con la constitución litológica de la formación y determinan que las facies hidroquímicas en la zona estudiada sean cloruradas hidrogenocarbonatadas sódicas.

El factor de concentración del ion cloruro respecto al agua de lluvia oscila entre 87,0 y 92,41 (**tabla 3.11**), lo que demuestra la pequeña variación que se produce en la composición química del agua. El TSS varía entre 2 255 y 2 404 mg/L. Los procesos geoquímicos que explican la composición química de las aguas son el intemperismo de las plagioclasas y la oxidación de la pirita (**tabla 3.10**).

En la **figura. 3.4 e**, se presentan los patrones originales y extraídos de las aguas del pozo P-180, que drena la Fm. Iberia. Los patrones originales varían desde 613-181 hasta 712-271, pero al extraer el cloruro de sodio se aprecia una pequeña variación desde 523-181 hasta 613-181 (**tabla 3.3 c**), lo que se corresponde con la presencia de areniscas y diabasas, que son los principales constituyentes de la formación analizada. Los patrones obtenidos definen las aguas como hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas magnésicas.

El factor de concentración del ion cloruro respecto al agua de lluvia, experimenta una pequeña variación desde 18,53 hasta 22,88 (**tabla 3.11**). Los TSS oscilan entre 1 164 y 1 577 mg/L, reflejando una elevada mineralización en esta agua. Los procesos geoquímicos que explican la composición química en este sitio son similares a los analizados para la formación Caobilla (**tabla 3.10**).

Los pozos P-Acueducto Manatí, P-175, P-53 y el P-Cocal II, inicialmente fueron ubicados sobre la Fm. Vázquez, pero en el transcurso de la investigación se pudo constatar que los mismos se encuentran en la frontera de otras formaciones (Caobilla

y Sedimentos aluviales), en las que predominan tobas, basalto y areniscas; este hecho justifica la composición química y los patrones hidrogeoquímicos encontrados en estos pozos.

En la **figuras 3.4 a, b, c, d, e**, se muestran los patrones originales y extraídos de los pozos P-Acueducto Manatí, P-175 y P-53, los que se caracterizan por la presencia de altos contenidos de sodio y magnesio. Los patrones originales varían entre 811-361 y 712-451, mientras que en los extraídos la variación se encuentra entre 811-181 y 631-181 (**tabla 3.3 a**). Estas aguas tienden a ser hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas e hidrogenocarbonatadas cloruradas sódicas magnésicas.

El factor de concentración del cloruro en estas aguas respecto al de las lluvias tiende a ser muy elevado, variando entre 15,24 y 117,65 (**tabla 3.11**), con mineralización entre 679 y 3 212 mg/L. Dentro de este conjunto de aguas se destacan las aguas minerales del P-175, que se localiza en la cercanía del municipio Jesús Menéndez. Su composición química se explica mediante los procesos geoquímicos: disolución de halita, intemperismo de plagioclasas, serpentinitas y oxidación de pirita (**tabla 3.10**).

Del análisis de la evolución de los patrones hidrogeoquímicos y del tipo de agua correspondiente a las concentraciones mínima, media y máxima de cada formación geológica se concluye lo siguiente:

El grupo I, integrado por aquellos pozos cuyas aguas interactúan principalmente en su fuente de alimentación o en el sitio donde se encuentran ubicados, con calizas, calizas dolomitizadas, calcarenitas, margas, areniscas, arcillas y ocasionalmente con otras litologías constituidas por minerales poco solubles, tiende a evolucionar, en su trayectoria subterránea, disolviendo halita, albita, calcita, dolomita y pirita.

El grupo II, formado por aguas de pozos y presas, que en su recorrido subterráneo o subsuperficial drenan calizas, areniscas, arcillas, margas y materiales de origen volcánico. Se diferencia del grupo anterior por presentar un mayor contenido de sodio y sus patrones hidrogeoquímicos extraídos, presentan un contenido adicional de sodio. Estas aguas evolucionan disolviendo principalmente halita, albita, calcita, dolomita y pirita.

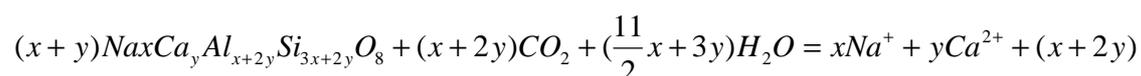
El grupo III, constituido por pozos que, aunque en ocasiones están localizados en formaciones geológicas constituidas por rocas carbonatadas, adquieren su composición química por interacción con areniscas, calcarenitas, tobas, diabasas, serpentinitas y calizas. En su evolución química disuelven principalmente albita, halita, pirita y serpentinita.

El grupo IV, que lo constituyen dos pozos ubicados en el Macizo Hidrogeológico del Cretácico, y sus materiales acuíferos están constituidos por carbonatos y por rocas de origen volcánico, como tufitas, lavas y tobas con componente basáltico. Estas aguas evolucionan disolviendo principalmente halita, calcita y serpentinita.

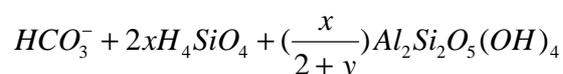
### 3.7 Cálculo de las fórmulas de las plagioclasas mediante modelación hidrogeoquímica

El mineral plagioclasa consiste en una solución sólida que contiene diferentes proporciones de albita ( $\text{Na}^+$ ) y anortita ( $\text{Ca}^{2+}$ ). En las aguas, donde el contenido de calcio se debe al proceso de intemperismo de las areniscas y otras rocas que contienen mineral plagioclasa, es posible determinar la fórmula de dicho mineral a partir de las concentraciones en mili mol por litro (mmol/L) de los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$  del agua. **M. Rodríguez Piña (2004)**.

El proceso de intemperismo de las plagioclasa se expresa mediante la siguiente ecuación:



Plagioclasa



Caolinita

( $x$  = mili mol de  $\text{Na}^+$ ;  $y$  = mili mol de  $\text{Ca}^{2+}$ )

En las aguas estudiadas en Las Tunas, las de los pozos P-Acueducto de Manatí, P-Alba Flores, P-175, P-180 y P-32, tienen un contenido de calcio despreciable y teniendo en cuenta sus patrones hidrogeoquímicos y las características del medio

geológico drenado, se puede asumir que todo el calcio corresponde al mineral anortita de la plagioclasa (asumiendo despreciable el aporte de calcita). Sobre esa base fueron calculadas las fórmulas de las plagioclasas presentes en los materiales acuíferos de los mencionados pozos, las cuales se muestran en la **tabla 3.11**. La fórmula calculada a partir los 143 datos de sodio y calcio correspondiente a los pozos estudiados fue:  $\text{Na}_{0.91}\text{Ca}_{0.09}\text{Al}_{1.09}\text{Si}_{2.91}\text{O}_8$ . (**Tabla 3.21 Anexo IX**)

### **3.8 Análisis de series cronológicas de variable hidroquímicas**

Las observaciones sistemáticas en manantiales o sitios de interés ponen de manifiesto que las crecidas están asociadas a aguas más o menos concentradas en cloruro e hidrogenocarbonato y luego durante el agotamiento de los caudales aparecen aguas con una composición contraria. **E. Custodio (1986)**. También se da el caso que mientras unos iones disminuyen su concentración con las lluvias por efecto de dilución, otros la aumentan como resultado del aporte del agua almacenada con anterioridad (efecto pistón). Por tanto, el análisis de series cronológicas, con una adecuada frecuencia de muestreo, puede dar información sobre la presencia temporal de los distintos tipos de flujos del acuífero.

La variabilidad de la composición química del agua puede caracterizarse mediante el coeficiente de variación del TSS, de la dureza, de la conductividad eléctrica o de otra variable hidroquímica. **E. T. Shuster y W. B. White (1971); R. L. Jacobson y D. Langmuir (1974)**. Las aguas que discurren por fisuras y conductos abiertos poseen un mayor coeficiente de variación que las que se mueven en forma difusa a través de poros, puesto que en el primer caso se produce un mayor efecto del clima en la fluctuación de las variables hidroquímicas.

En el epígrafe 3.5 de este capítulo se hizo un ligero esbozo sobre el efecto de la lluvia sobre la composición química del agua muestreada en La Tunas. En este epígrafe se estudia la variación en el tiempo de la composición química de las aguas en este territorio, mediante el análisis de las series temporales de algunos pozos, con vistas a relacionar esa composición con las características del suelo, la litología drenada y las peculiaridades estructurales del acuífero. En general, la variación de la composición química de un agua subterránea, incluyendo el agua kárstica, está relacionada con las fluctuaciones del régimen de lluvia durante el año (ciclo

hidrológico), dado que en determinado sitio, dicha composición se debe a la respuesta ante las precipitaciones del sistema de flujos del acuífero.

En la **tabla 3.12 Anexo VII**, se muestran los valores medios de las variables:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{CaCO}_3$  y TSS, correspondientes a los períodos húmedo y seco, de las 30 fuentes estudiadas en Las Tunas. Para el análisis de la variación temporal de la composición química se tuvieron en cuenta los valores del coeficiente de variación del TSS y la concentración iónica de los datos agrupados por períodos húmedos y secos (**tabla 3.12, Anexo VII**). En las **tablas 3.13 a, b, c, Anexo VIII**, se muestran las principales características del acuífero, las que se infieren del comportamiento temporal de las variables, teniendo en consideración la litología presente y el tipo de agua.

En las presas Cayoyo y Rincón, donde el flujo es de tipo superficial, la composición química (**tabla 3.13 c, Anexo VIII**), expresada en términos de contenidos iónicos de  $\text{CO}_2$ , de dureza ( $\text{CaCO}_3$ ) y del TSS, experimenta una gran variación temporal, tal como lo indican las altas magnitudes de los coeficientes de variación del TSS ( $\text{CV}_{\text{TSS}}$  entre 31.5 y 75.3 %).

Las concentraciones de los iones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ , la del  $\text{CaCO}_3$  y TSS tienden a incrementarse en el período seco. Este comportamiento está relacionado con el efecto de dilución producido por la mayor abundancia de lluvias en el período húmedo. Por el contrario, el contenido de  $\text{Cl}^-$  en las aguas tiende a incrementarse en el período húmedo, debido a la lixiviación del  $\text{NaCl}$  presente en exceso en el suelo por donde discurre el agua superficial antes de arribar a las presas.

En los acuíferos desarrollados en las margas y calizas de la Fm. Vázquez, de la Cuenca Tunas Norte, con evidente comportamiento de acuífero cársico, inferido de su composición química con facies hidrogenocarbonatadas cálcico magnesianas y sódico cálcicas (P-87, P-104, P-105, P-12 y P-19), predominan las aguas con gran variabilidad en su composición química (valores de  $\text{CV}_{\text{TSS}}$  entre 8.9 y 26.1 %).

La concentración de todos los iones, incluyendo el cloruro, así como la dureza y la mineralización global (TSS) son mayores en el período seco, lo que es consecuencia del efecto de concentración. Las aguas durante su trayectoria subterránea disuelven los minerales disponibles, tanto en el suelo por donde discurren, como los de las

rocas constitutivas del acuífero, con una tendencia a alcanzar los equilibrios químicos correspondientes. En el período húmedo, cuando son más abundantes las lluvias, predominan los procesos de dilución de minerales, pudiendo no alcanzarse los equilibrios químicos. Los acuíferos carbonatados con gran desarrollo cársico (con magnitudes más elevadas de  $CV_{TSS}$ ), tienden a comportarse como las aguas superficiales.

Las aguas subterráneas de los acuíferos desarrollados en calizas de las formaciones Yayal, Arroyo Palma y Güines, de la Cuenca Sur de Las Tunas (P-139, P-Carretera Amancio, P-Las Maboas y el P-292), tienen una variabilidad menor en su composición, que la de las aguas de la Fm. Vázquez, (valores de  $CV_{TSS}$  entre 9.6 y 14.1 %). La concentración de los iones  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $Na^+$  tienden a concentrarse más en el período húmedo, mientras que los contenidos de  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $CaCO_3$  y TSS no presentan una tendencia definida, en unos casos se incrementan y en otros disminuyen en una determinada estación.

El hecho de que con la mayor disponibilidad de lluvias, se observe una mayor concentración de las variables hidroquímicas, pudiera atribuirse al efecto pistón. **E. Custodio (1986)**, mediante el cual las aguas de lluvia desplazan a las aguas más concentradas que se encuentran almacenadas en los sistemas anexos del carso. **I. Antigüedad (1997)**. Un comportamiento similar al de las aguas analizadas, se observa en las aguas procedentes de los pozos perforados en rocas del Macizo Hidrogeológico del Cretácico, que poseen calizas de las formaciones Yayal y Contramaestre en su constitución (P-195, P-Central Jobabo, P-Quinta Planta y el P-La Siberia).

En este caso las magnitudes  $CV_{TSS}$  varían entre 4,1 y 14,3 %, lo cual es típico de un acuífero carbonatado de pequeño a moderado desarrollo cársico (**tabla 3.13 c Anexo VIII**). Las concentraciones de los iones  $HCO_3^-$  y  $Cl^-$  tienden a incrementarse en los períodos húmedos, mientras que la concentración del ion  $Mg^{2+}$  y la dureza son mayores en el período seco.

Los pozos Siete Aulas y Reparto Militar, perforados en calcarenitas de la Fm. Puerto Padre, poseen poca variabilidad en su composición química global (las magnitudes  $CV_{TSS}$  varían entre 4.4 y 8.2 %), lo que se debe a la porosidad del acuífero, con poco

desarrollo cársico (**tabla 3.13 a Anexo VIII**). La concentración iónica ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) de esta agua tiende a concentrarse más en el período seco por efecto pistón, en forma semejante a otros pozos perforados en calizas anteriormente analizadas.

Las aguas subterráneas que discurren por lavas, tobas y calizas de la Fm. Guáimaro (P-Cabecera de Colombia y P-Circunscripción 7), poseen una variabilidad en su mineralización global de moderada a alta ( $\text{CV}_{\text{TSS}}$  con valores entre 7,9 y 14,5%). La composición iónica ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ), la dureza y el TSS tienden a incrementarse en el período de mayor pluviosidad. Estos acuíferos pueden considerarse de tipo carbonatados, con moderado desarrollo cársico.

Las aguas de los pozos de la Fm. Vázquez, en la Cuenca Tunas Norte, que atendiendo a la composición obtenida una vez extraído el cloruro de sodio, son hidrogenocarbonatadas sódicas ( $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ ) y hidrogenocarbonatadas sódicas magnesianas ( $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ ), (P-Acueducto Manatí, P-175, P-El Cocal II y P-53), y los pozos de la formaciones Iberia, Guáimaro y Caobilla, en el Macizo Hidrogeológico del Cretácico, de composición similar, tienen una variabilidad en su composición global que varía de pequeña a relativamente grande ( $\text{CV}_{\text{TSS}}$  varía entre 4.4 y 28.8%).

Los iones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ , así como la dureza y el TSS se concentran más en el período húmedo, mientras que  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  tienden a concentrarse en el período seco. Este comportamiento en acuíferos que se desarrollan en fisuras más o menos agrietados (**tablas. 3.13 a y 3.13 c, Anexo VIII**), puede deberse a las diferentes modalidades de flujos que drenan los macizos en rocas de constitución básica.

Las aguas hidrogenocarbonatadas magnésicas cálcicas ( $\text{HCO}_3^- - \text{Mg} > \text{Ca}^{2+}$ ), típicas de serpentinitas (P-MINAZ y P-45), una vez extraído el cloruro de sodio, poseen una variabilidad temporal de TSS relativamente baja, ( $\text{CV}_{\text{TSS}}$  con valores entre 2.6 y 7,9%). Algunos de sus iones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ), el  $\text{CaCO}_3$  y el TSS tienden a concentrarse en el período seco. De acuerdo con estas propiedades esos acuíferos

pueden considerarse de tipo fisurado, con moderado grado de agrietamiento (**tabla 3.13 c Anexo VIII**).

El CO<sub>2</sub>, originado en el proceso de descomposición de las plantas, es más abundante en el período húmedo que en el seco, en casi todas las fuentes estudiadas (**tabla 3.12 Anexo VII**), lo cual evidencia que el proceso microbiológico de descomposición de las plantas en el suelo, es más activo en presencia de abundante humedad y de temperaturas relativamente cálidas. Un comportamiento similar se ha reportado en otras regiones de Cuba. **J. R. Fagundo (1996)**.

Los resultados de las tablas 3.15 a, b, c, ponen de manifiesto que la menor variabilidad de la composición química del agua (menores valores de coeficiente de variación de TSS), se produce en los acuíferos porosos, desarrollados en tobas, areniscas y calcarenitas ( $CV_{TSS} < 8 \%$ ) y que la mayor variabilidad ocurre, por lo general, en los acuíferos cársicos, constituidos por calizas y margas ( $CV_{TSS} > 8 \%$ ).

Teniendo en cuenta que algunas de las fuentes estudiadas presentan una estabilidad en su composición química, expresada por un coeficiente de variación del TSS inferior al 8 %, y en algunos casos, poseen valores de mineralización total por encima de 1 g/L, se puede sugerir su uso como agua mineral para embotellamiento o uso terapéutico (P-32, p-248, P-175, P-195, Reparto Militar, Acueducto Manatí, Circunscripción 7), siempre que cumplan los restantes requisitos de las correspondientes normas de uso, **NC. 93-01-218: (1995)**; **N.C 2: (1996)**. Otra opción sería explorar la posibilidad de hacer nuevas captaciones en esos sitios, que satisfagan los requerimientos de dichas normas.

En las **figuras 3.5 a, b, c, d, e, f**, se ilustran las variaciones temporales de las principales variables hidroquímicas estudiadas (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, CaCO<sub>3</sub> y TSS) en algunas muestras representativas de los diferentes grupos de aguas (Presa Cayojo I y P-104, P-Las Maboas, P-Alba Flores, P-175 y P-MINAZ). En el P-104, representativo de las aguas cársicas del grupo I, las mejores correlaciones temporales se observan entre HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup> y TSS; entre Ca<sup>2+</sup> y CaCO<sub>3</sub>, y entre Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup> (**figura 3.5 a**). Un comportamiento parecido se observa en las aguas del P-Las Maboas, representativo del mismo grupo I (**figura 3.5 b**).

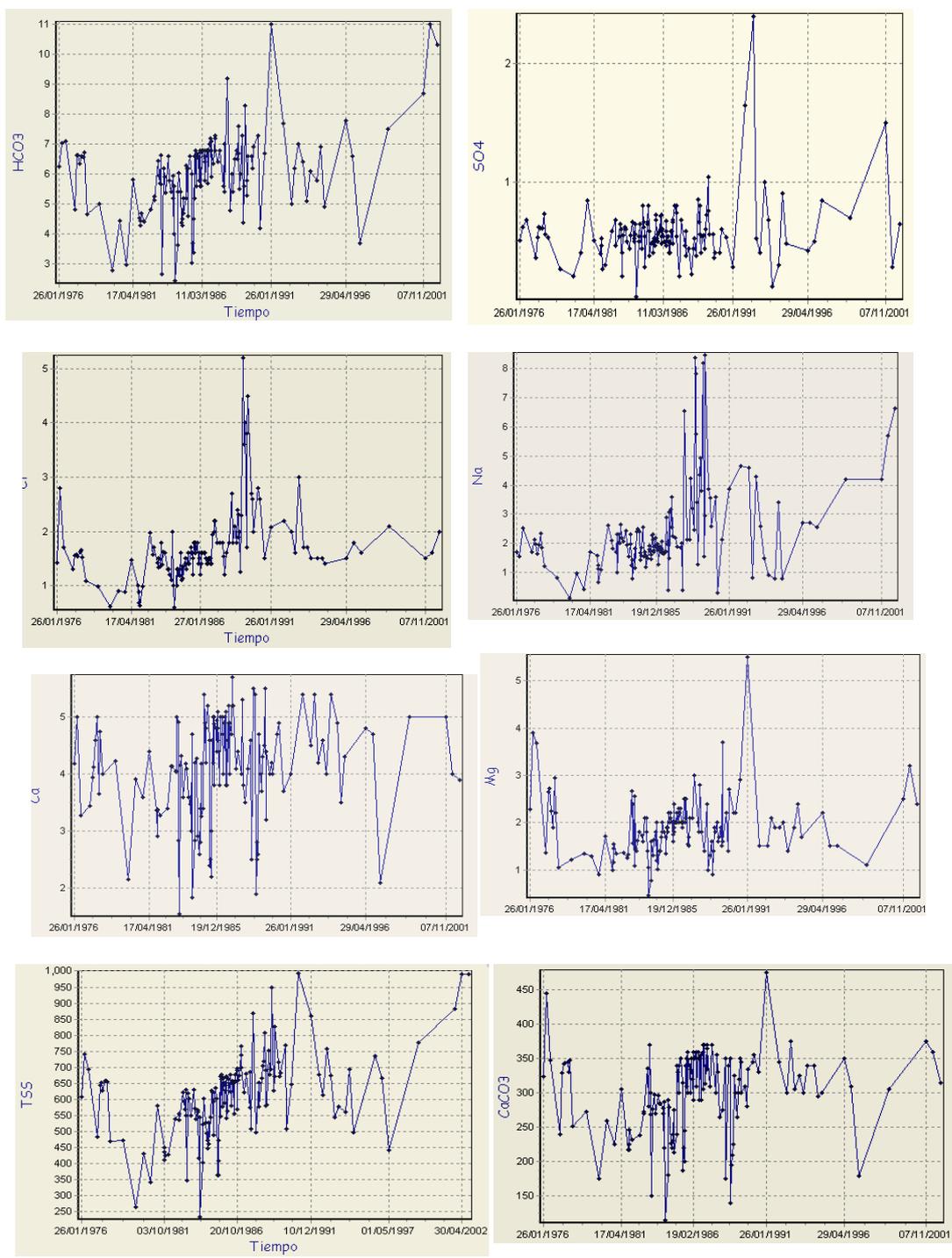


Figura 3.5.a. Variación temporal de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SST y CaCO<sub>3</sub>. Pozo P-104 (La Cana).

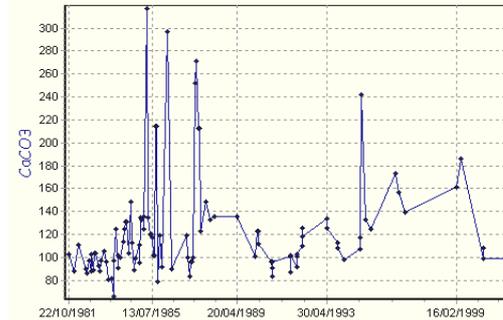
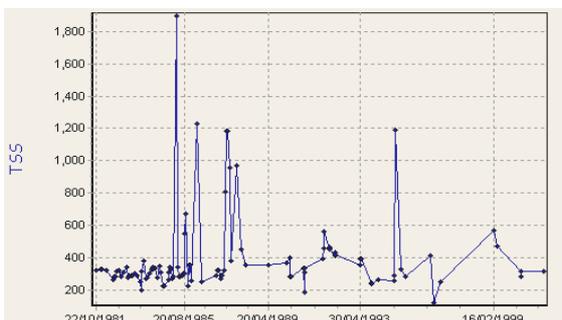
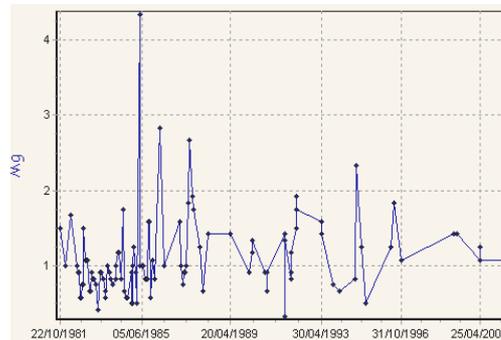
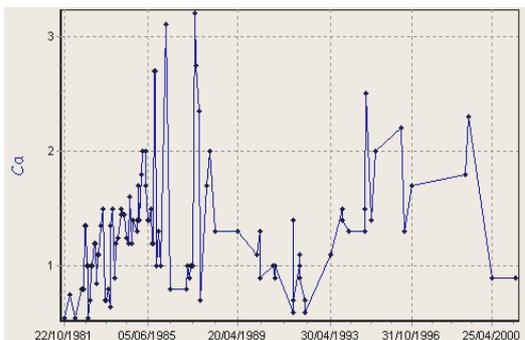
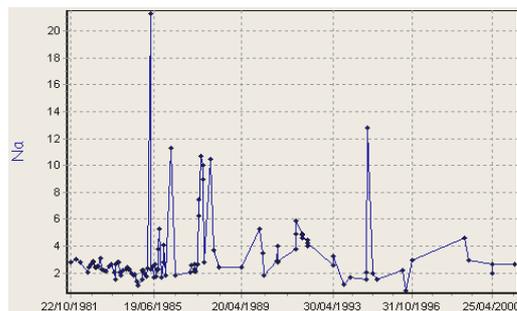
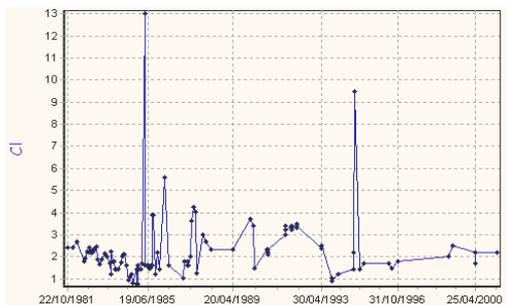
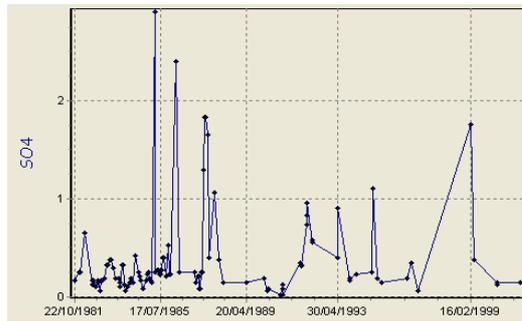
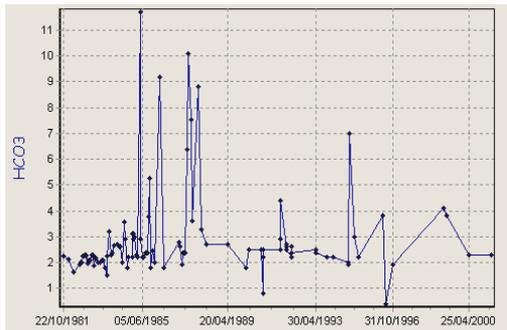


Figura 3.5.b. Variación temporal de  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , SST y  $\text{CaCO}_3$ . Presa Cayojo I.

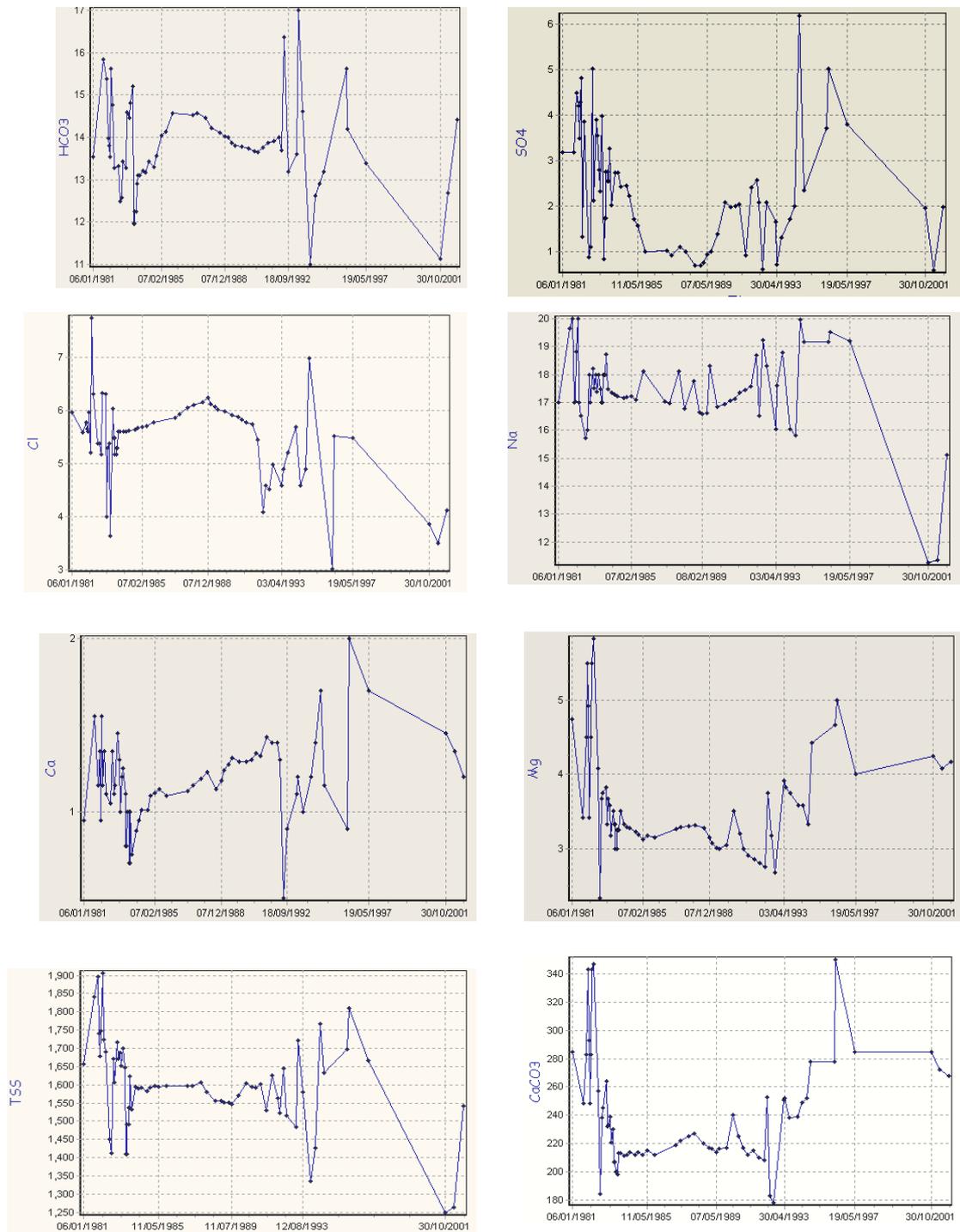


Figura 3.5.c. Variación temporal de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SST y CaCO<sub>3</sub>. Pozo P-175.

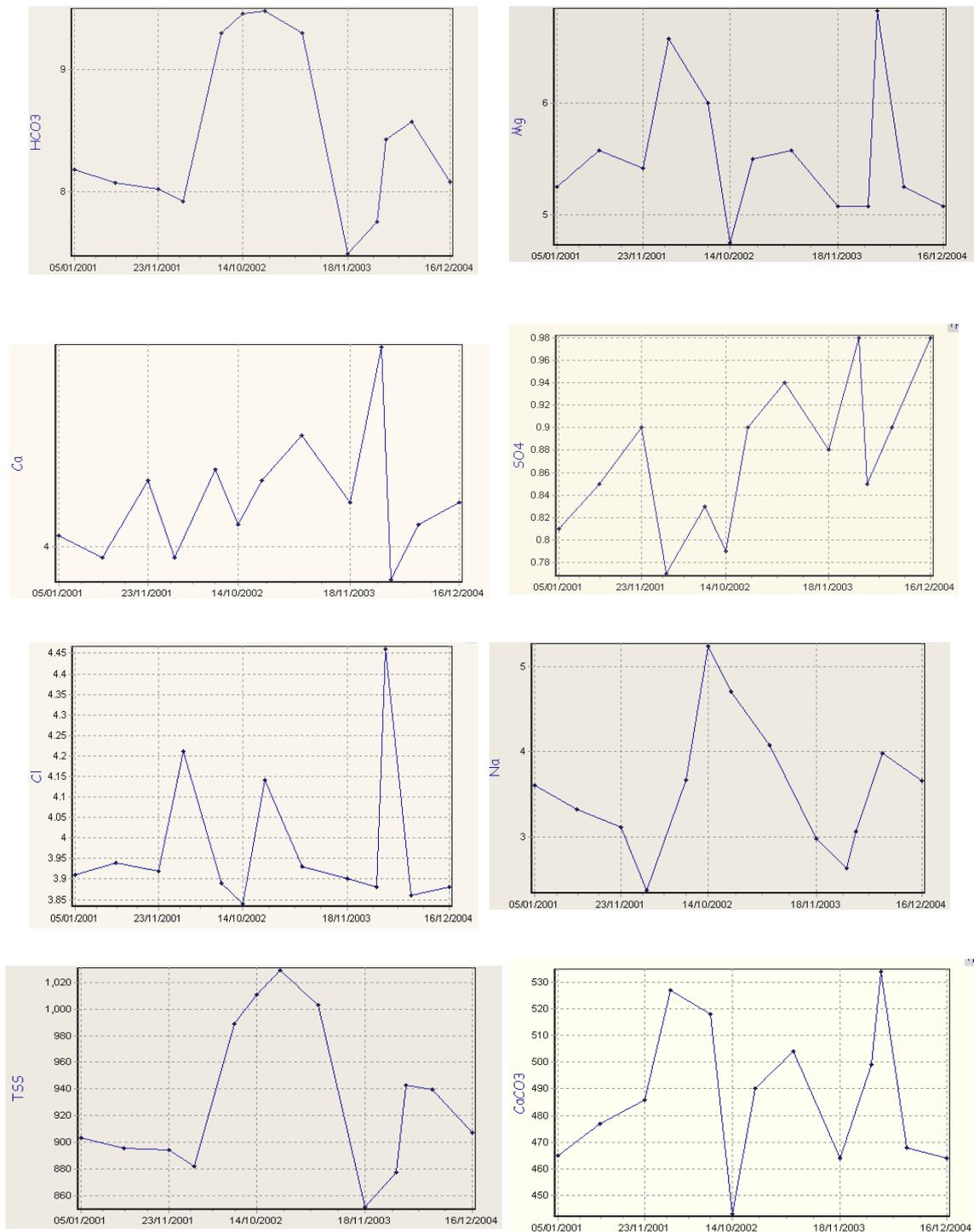


Figura 3.5.d. Variación temporal de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SST y CaCO<sub>3</sub>. Pozo MINAZ.

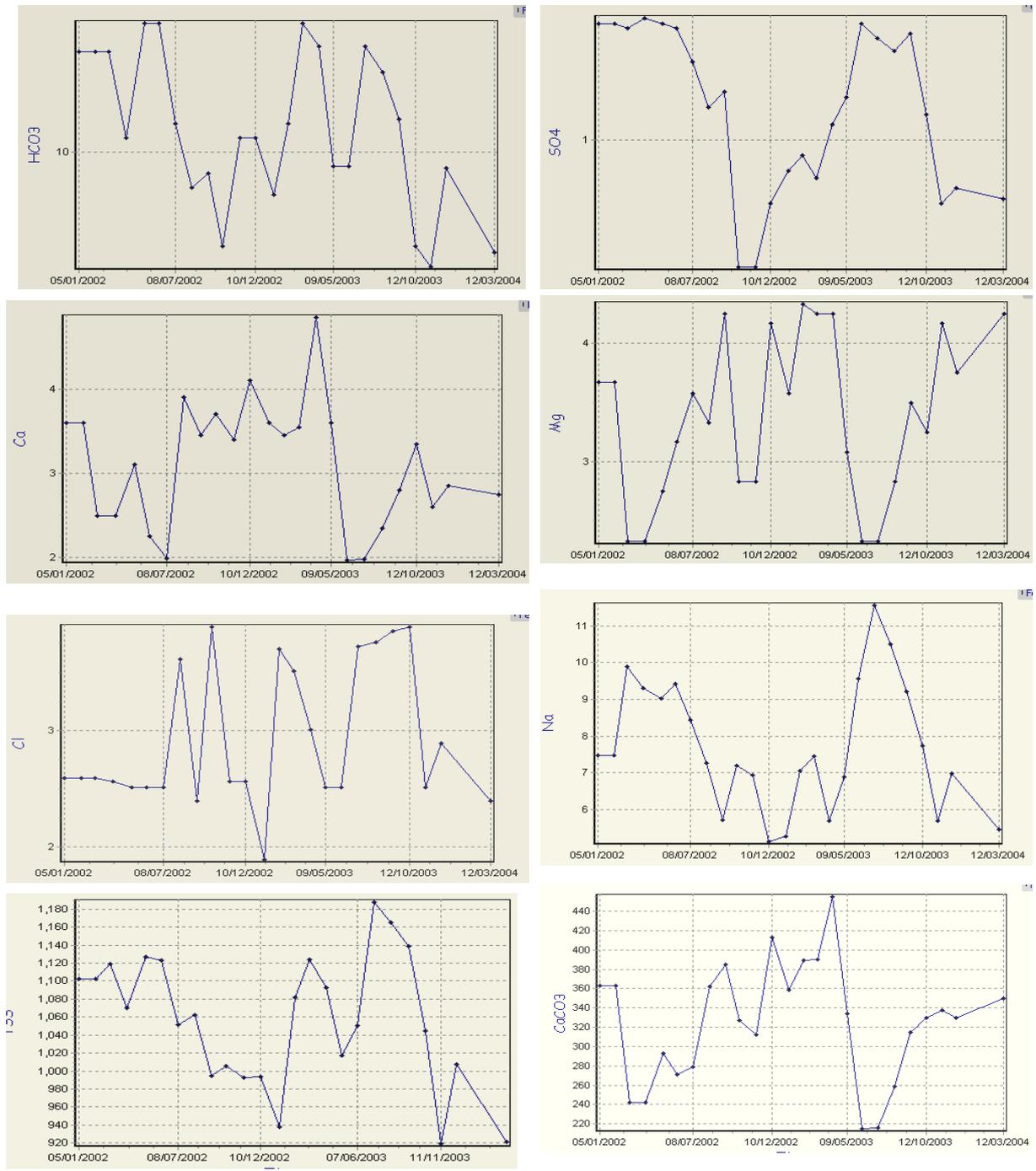


Figura 3.5.e. Variación temporal de  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , SST y  $\text{CaCO}_3$ . Pozo Alba Flores.

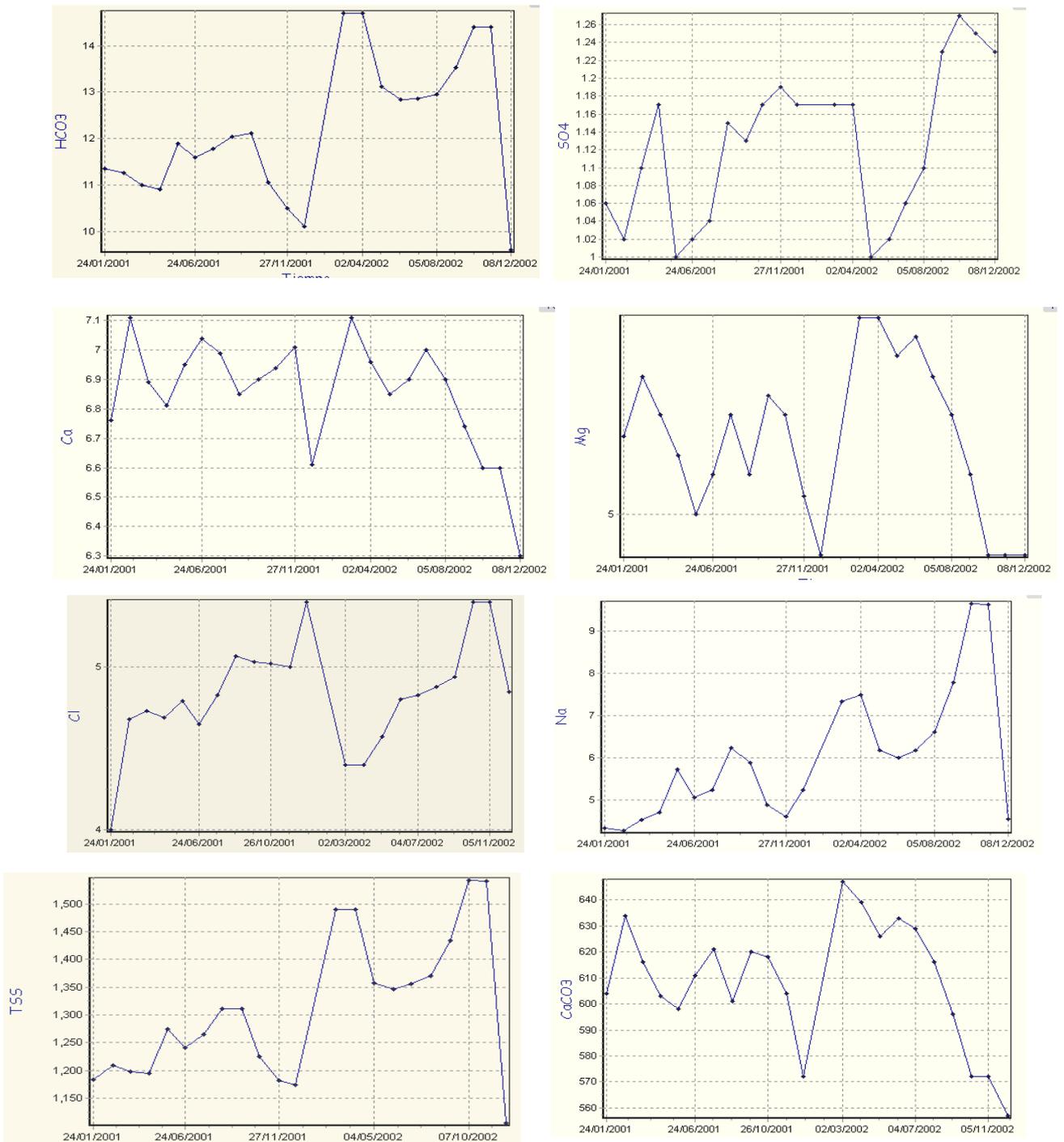


Figura 3.5.f. Variación temporal de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, SST y CaCO<sub>3</sub>. Pozo Las Maobas.

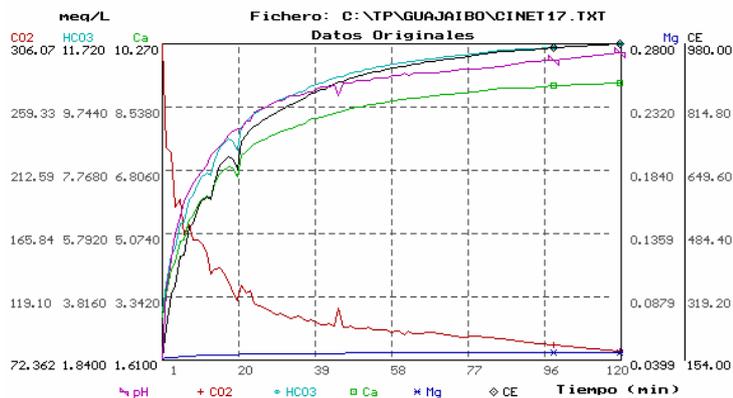
En la Presa Cayojo I, representativa de un agua superficial (Grupo II) se observa buena correlación temporal entre  $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+$ ;  $\text{HCO}_3^-/\text{TSS}$ ;  $\text{Ca}^{2+}/\text{CaCO}_3$ ;  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^-/\text{Na}^+$  (**figura 3.5 b**). En los pozos Alba Flores y P-175, representativos de las aguas del grupo III, típicas de acuíferos constituidos por rocas básicas, correlacionan bien entre sí el  $\text{HCO}_3^-/\text{TSS}$ ;  $\text{Mg}^{2+}/\text{CaCO}_3$  (**figuras 3.5 c y 3.5 e**). En el pozo MINAZ, representativo de un agua del grupo IV, cuya composición indica que drena principalmente serpentinitas y basaltos, se observa buena correlación entre los iones  $\text{HCO}_3^-/\text{TSS}$ ;  $\text{Mg}^{2+}/\text{CaCO}_3$  y entre  $\text{Cl}^-/\text{Mg}^{2+}$  (**figura 3.5 d**).

### 3.9 Simulación en el laboratorio de los procesos de interacción agua-roca carbonatada

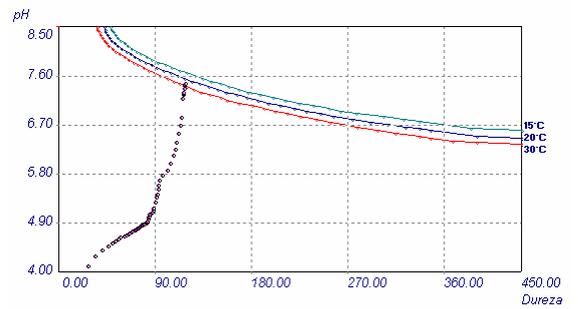
Con el objetivo de dilucidar cómo las aguas de la provincia de Las Tunas, adquieren su composición química en el proceso de interacción agua-roca, se seleccionaron dos muestras representativas de los principales depósitos carbonatados de esa provincia: un sedimento de la Fm. Vázquez, cuyo material carbonatado está constituido principalmente por caliza, y un sedimento de la Fm. Güines, constituido mayormente por dolomita. Un resumen de los resultados de dichos experimentos se muestran en las **tablas 3.14** (Fm. Vázquez) y **3.15** (Fm. Güines). En general, las velocidades de reacción ( $\frac{dC}{dt}$ ) a los 30 minutos (5,55 para la Fm. Güines y 2,10 para la Fm. Vázquez) y los valores de la constante de velocidad  $k$ :  $k = 1/t^n \ln [C_{E_{eq}}/(C_{E_{eq}} - C_E)]$ , son mayores en la Fm. Güines ( $k = 0.00436 \pm 0.0022 \text{ min}^{-1}$ ), que en la Fm. Vázquez ( $k = 0.0035 \pm 0.0021 \text{ min}^{-1}$ ), lo cual es indicativo de una mayor solubilidad o porosidad de los carbonatos de la primera formación rocosa.

En la **figuras 3.6 a y 3.7 a** se presentan los resultados de la variación en el tiempo de las variables químico físicas:  $\text{CO}_2$ , CE,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  del agua originada en el proceso de interacción agua-carbonato de las formaciones Vázquez y Güines respectivamente, cuyos cambios se producen de acuerdo a la ecuaciones cinéticas:

$$C_i = e^{-kt} \quad (\text{para el } \text{CO}_2); \quad C_i = C_{eq} (1 - e^{-ktn}) \quad (\text{para las restantes variables}).$$



a)



b)

Figura 3.6. a) Variación en el tiempo de  $\text{CO}_2$ , CE,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y b) Diagrama de Tillman Trombe en un experimento de disolución de una caliza de la Fm. Vázquez. Provincia Las Tunas.

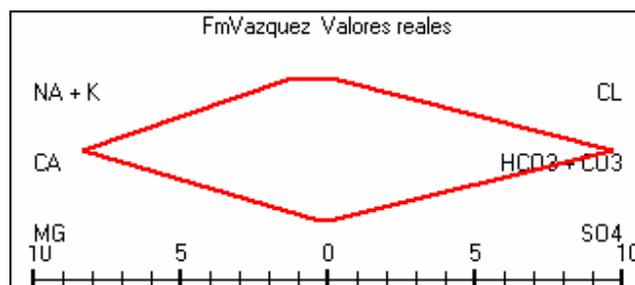


Figura 3.6 c. Patrón hidrogeoquímico de la Fm. Vázquez en el equilibrio químico. Provincia Las Tunas

Donde:  $C_i$  es la concentración de la variable hidroquímica que varía en el tiempo,  $C_{eq}$  es la variable en el equilibrio químico, y  $n$  es un factor exponencial empírico. Los valores de  $C_i$  al final de la reacción se muestran en las **tablas 3.14** (Fm. Vázquez) y **3.15** (Fm. Güines). Los valores del exponente  $n$  fueron en ambos casos  $n = 0.97$ , lo que indica que en las condiciones experimentales realizadas, la cinética de reacción fue de primer orden.

**Tabla 3.14. Resumen de los resultados del experimento de disolución de una caliza de la Fm. Vázquez. Provincia de Las Tunas.**

No	Hora	T °C	pH UpH	CE $\mu$ S/cm	CO <sub>2</sub> mg/L	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> meq/L	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> meq/L	Cl <sup>-</sup> meq/L	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> meq/L	Ca <sup>2+</sup> meq/L	Mg <sup>2+</sup> meq/L	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> meq/L	CaCO <sub>3</sub> mg/L	Patrón
1	7:01	25.0	4.12	51	4344.5	0.60	0.00	0.13	0.00	0.53	0.01	0.19	27	271-181
2	7:10	25.0	4.70	119	2666.8	1.43	0.00	0.13	0.00	1.25	0.03	0.28	64	181-181
3	7:20	25.0	4.84	144	2324.5	1.73	0.00	0.13	0.00	1.51	0.03	0.32	77	181-181
4	7:30	25.0	4.94	157	2001.0	1.88	0.00	0.13	0.00	1.65	0.04	0.32	85	181-181
5	7:48	25.0	5.19	175	1223.8	2.05	0.00	0.13	0.00	1.78	0.04	0.36	91	181-181
6	8:03	25.0	5.61	186	487.1	2.15	0.00	0.13	0.00	1.88	0.04	0.36	96	181-181
7	9:00	25.0	6.15	211	159.9	2.46	0.00	0.13	0.00	2.15	0.05	0.39	110	181-181
8	11:15	25.0	7.39	224	10.0	2.70	0.00	0.13	0.00	2.36	0.06	0.41	121	181-181
9	11:55	25.0	7.47	225	8.3	2.71	0.00	0.13	0.00	2.37	0.07	0.40	122	181-181

**Tabla 3.15. Resumen de los resultados del experimento de disolución de una dolomita de la Fm. Güines. Provincia Las Tunas**

No	Hora	T °C	pH UpH	CE $\mu$ S/cm	CO <sub>2</sub> mg/L	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> meq/L	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> meq/L	Cl <sup>-</sup> meq/L	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> meq/L	Ca <sup>2+</sup> meq/L	Mg <sup>2+</sup> meq/L	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> meq/L	CaCO <sub>3</sub> mg/L	Patrón
1	7:01	25.0	4.00	55	5826.8	0.61	0.00	0.11	0.00	0.24	0.24	0.24	24	325-181
2	7:11	25.0	4.47	158	5424.8	1.72	0.00	0.11	0.00	0.73	0.72	0.38	73	253-181
3	7:21	25.0	4.67	196	4209.7	2.13	0.00	0.11	0.00	0.91	0.90	0.43	91	154-181
4	7:31	25.0	4.79	217	3525.6	2.36	0.00	0.11	0.00	1.01	1.00	0.46	101	154-181
5	7:41	25.0	4.88	229	3005.9	2.48	0.00	0.11	0.00	1.07	1.05	0.47	106	154-181
6	8:10	25.0	5.17	245	1643.1	2.65	0.00	0.11	0.00	1.15	1.13	0.48	114	154-181
7	9:20	25.0	5.83	250	367.2	2.71	0.00	0.11	0.00	1.18	1.17	0.47	118	154-181
8	10:20	25.0	6.16	256	175.3	2.77	0.00	0.11	0.00	1.22	1.21	0.45	122	154-181
9	11:15	25.0	6.89	257	32.8	2.79	0.00	0.11	0.00	1.24	1.24	0.42	124	154-181

En la **figura 3.6 b** se muestra, mediante un diagrama de Tillman Trombe, la evolución del  $\text{CaCO}_3$  durante el experimento cinético llevado a cabo con el sedimento de la Fm. Vázquez. Nótese que la dureza del agua del reactor alcanza alrededor de 100 mg/L en el equilibrio. En la **figura 3.6 c**, se pone de manifiesto, mediante un diagrama de Stiff, que el patrón hidrogeoquímico (181-181) a partir de 10 minutos de reacción es típico de una caliza prácticamente pura (**tabla 3.14**).

En la **figura 3.7 b** se muestra, mediante un diagrama de Tillman Trombe, la evolución del  $\text{CaCO}_3$  durante el experimento cinético llevado a cabo con el sedimento de la Fm. Güines. Al igual que en el caso anterior, la dureza del agua del reactor alcanza alrededor de 100 mg/L cerca en el equilibrio. En la **figura 3.7 c**, se muestra, mediante un diagrama de Stiff, que el patrón hidrogeoquímico (154-181) a partir de los 20 minutos de reacción es típico de una dolomita muy pura (**tabla 3.15**).

Los resultados de los experimentos cinéticos refuerzan la hipótesis de que en el proceso de interacción agua-roca en la provincia de Las Tunas (al menos para los sedimentos estudiados), en ausencia de NaCl, las aguas adquieren una composición que está gobernada por la constitución litológica del material acuífero. Por ello en la composición química de las aguas de la provincia (**tabla 3.1**), interviene el cloruro de sodio adquirido en la zona de infiltración del acuífero, tal como quedó demostrado en los experimentos de lavado de suelo (**tablas 3.8, 3.9 a y 3.9 b**).

a)

b)

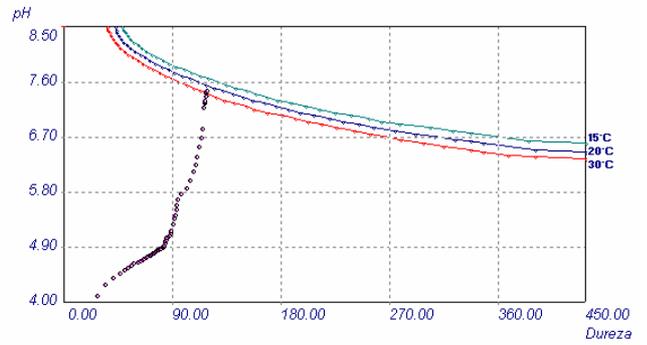
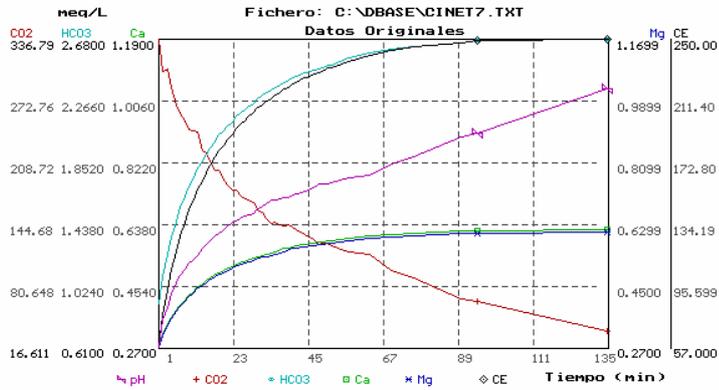


Figura 3.7.a) Variación en el tiempo de  $\text{CO}_2$ , CE,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  y b) Diagrama de Tillman Trombe en un experimento de disolución de una caliza de la en un experimento de disolución de una dolomía de la Fm. Güines. Provincia Las Tunas.

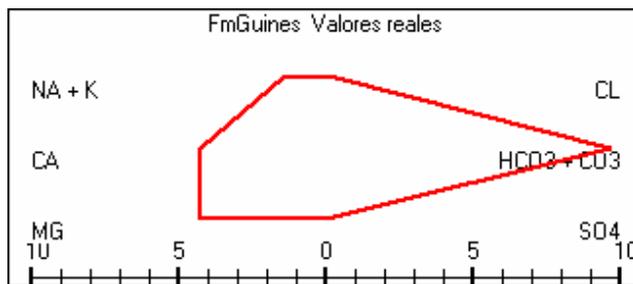


Figura 3.7 c. Patrón hidrogeoquímico de la Fm. Güines en el equilibrio químico. Provincia Las Tunas.

### **3.10 Estado de las aguas con respecto al equilibrio químico con los carbonatos**

Durante el tránsito del agua por el suelo de la zona de infiltración del acuífero, adquiere un cierto contenido de CO<sub>2</sub> (que depende de la materia orgánica disponible, las condiciones estructurales del suelo y del grado de actividad microbiana del mismo) y disuelve más o menos carbonatos hasta alcanzar el equilibrio químico. **J. R. Fagundo (1996)**. Por tanto, el grado de saturación de los minerales presentes (principalmente calcita y dolomita), brinda una valiosa información sobre las características de la zona de infiltración, el modo de tránsito del agua por el macizo y el tiempo de residencia de esta en el sistema. Así, un agua insaturada con poco contenido de iones disueltos indica que el tiempo de tránsito del agua a través del sistema acuífero no ha sido suficientemente largo para que se hayan establecido los equilibrios de los carbonatos.

Por el contrario, si el agua está sobresaturada y posee contenidos elevados de iones disueltos, indica que la misma ha permanecido suficiente tiempo en el interior del sistema. **J. R. Fagundo (1996)**. No obstante, en ocasiones un alto contenido de minerales disueltos pudiera estar asociado a la presencia de rocas muy trituradas o con un alto grado de porosidad. La ocurrencia de precipitaciones, también puede hacer que el agua se diluya, se haga insaturada respecto a los minerales constitutivos del acuífero, y por tanto agresivas, capaz de disolver nuevos minerales. **J. R. Fagundo (1996)**.

En las **figuras 3.8 a y 3.8 b** se muestra, mediante series cronológicas, el estado de equilibrio de las aguas del grupo I con respecto a la calcita (RSC) y la dolomita (RSD) respectivamente. En ambos casos, prevalecen las aguas sobresaturadas (valores positivos) o en el equilibrio (cerca de cero) con relación a las insaturadas (valores negativos), lo cual demuestra que las aguas de este grupo han permanecido un tiempo suficientemente largo en el interior de los correspondientes acuíferos para que, en los procesos de interacción agua-roca, se hayan establecido los equilibrios químicos y haya adquirido un exceso de carbonato. También puede haber contribuido a estos resultados la alta disponibilidad de CO<sub>2</sub> del suelo en la zona de infiltración, el

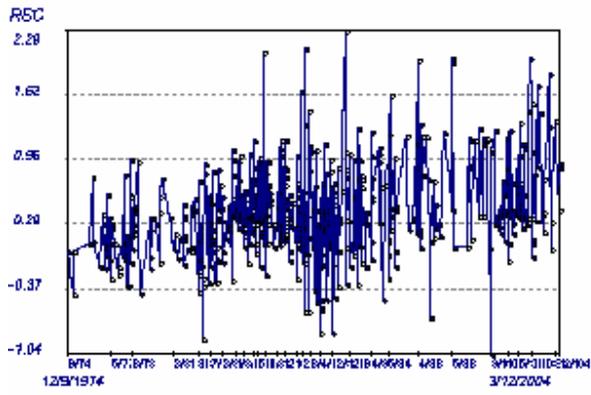
efecto salino que produce un incremento del contenido de  $\text{CaCO}_3$  disuelto en el agua y las escasas lluvias ocurridas en Las Tunas.

En la **figura 3.8 c** se observa, en un diagrama de Tillman Trombe, que las aguas permanecen sobresaturadas respecto a la calcita y ese estado se alcanza con una dureza relativamente alta, entre 180 y 450 mg/L. Debe señalarse que los resultados del estado de saturación respecto a la calcita, obtenidos mediante la aproximación de Tillman Trombe, son menos exactos que los obtenidos mediante el cálculo del RSC, ya que en este último se toman en consideración los iones complejos y en el anterior no.

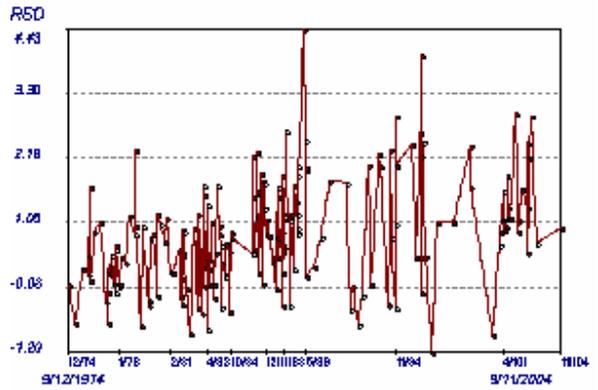
En la **figura 3.8 d** se ilustra la variación temporal del TSS. Estas magnitudes son relativamente altas (entre 571 y 1586 mg/L) en la mayoría de los casos, lo cual justifica que las aguas de este grupo se encuentren en su mayor parte, saturadas o sobresaturadas con respecto a los minerales carbonatados constitutivos de los acuíferos.

En las **figuras 3.9 a y 3.9 b** se presentan los resultados de la variación temporal de RSC y RSD, de las aguas del grupo II; prevalecen las aguas insaturadas o en estado de equilibrio con respecto a la calcita y la dolomita, debido a que la mayor parte de ellas pertenecen a presas. Estas aguas superficiales cuentan con poco  $\text{CO}_2$  disponible para la disolución de los minerales, ya que el mismo se adquiere del aire atmosférico cuyo contenido es bajo en comparación con el  $\text{CO}_2$  disponible en el aire del suelo.

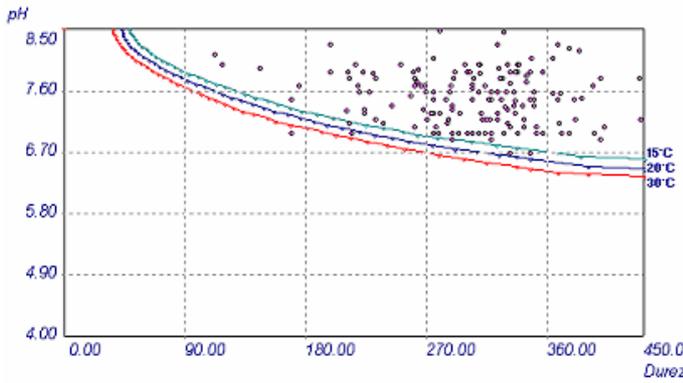
En el diagrama de Tillman Trombe, (**figura 3.9 c**) se aprecian muchas aguas que no han alcanzado el equilibrio o se encuentran sobre la isoterma de equilibrio, y su contenido de  $\text{CaCO}_3$  disuelto, adquirido en ese estado, es inferior al de las aguas subterráneas del grupo I (principalmente del orden de 90 a 200 mg/L). Las aguas correspondientes a las presas del grupo II poseen un contenido de minerales disueltos (TSS) inferior al de las aguas subterráneas del grupo I. Aquellas son precisamente las que se encuentran no saturadas respecto a la calcita y la dolomita, y se sitúan en la parte del diagrama de Tillman Trombe donde la dureza del agua es menor.



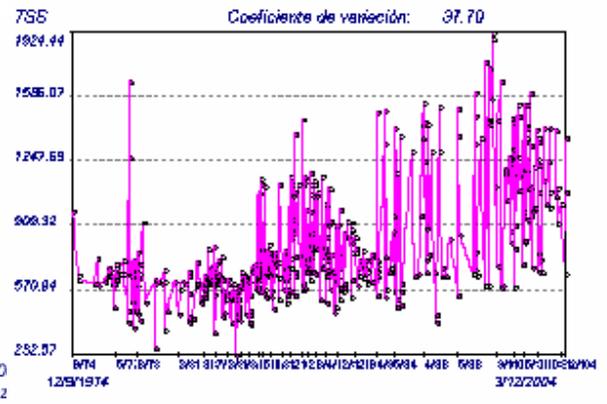
a)



b)



c)



d)

Figura 3.8. Estado de equilibrio químico de las aguas del Grupo I: a) RSC; b) RSD; c) Diagrama de Tillman Tombe; d) SST.

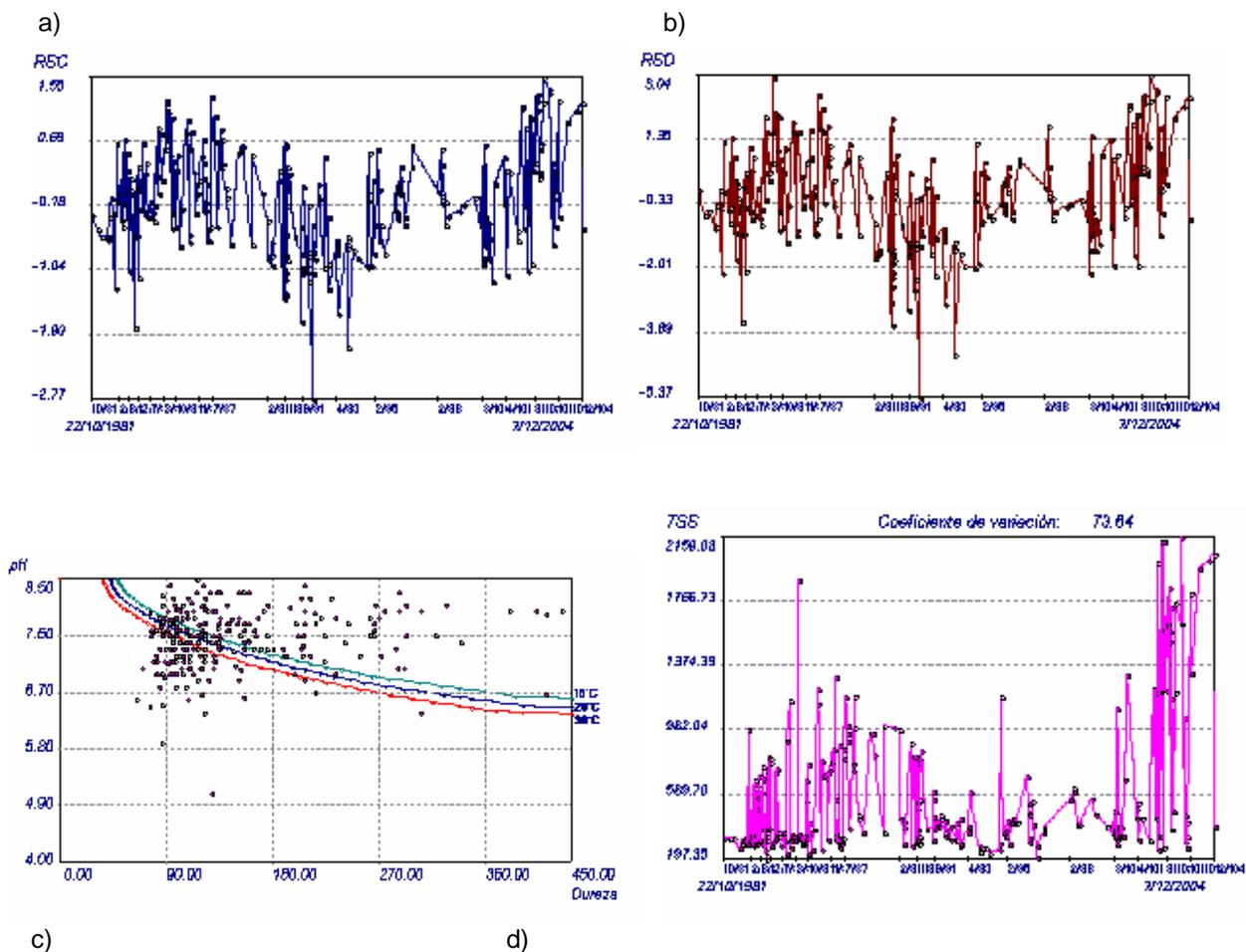
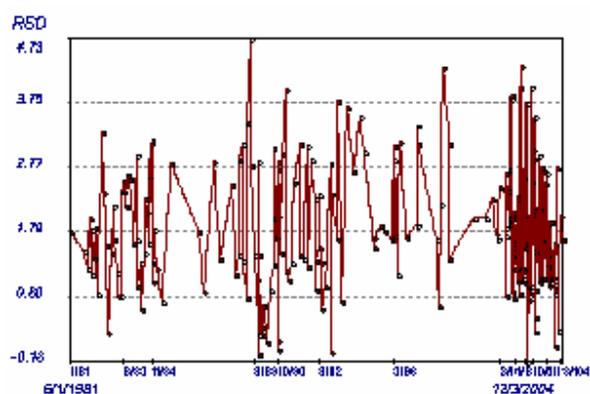
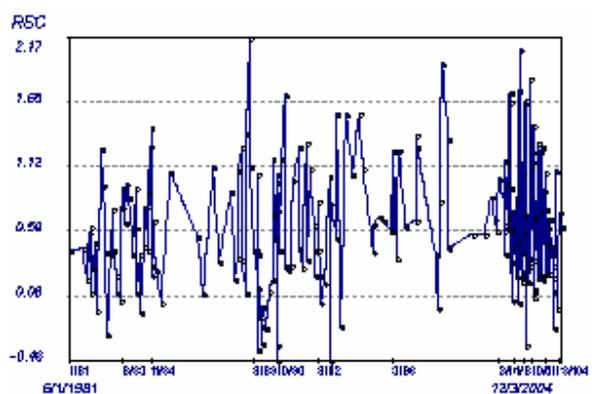
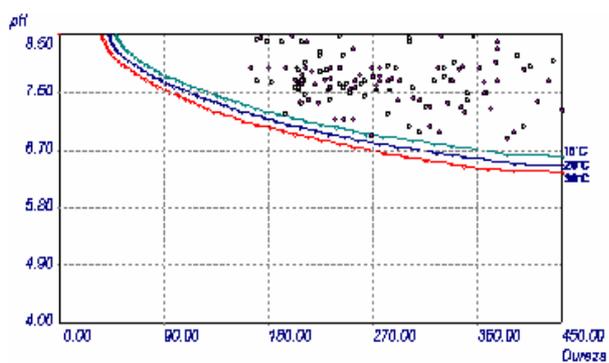


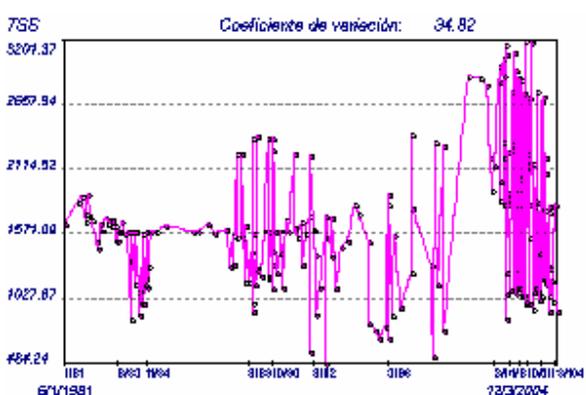
Figura 3.9. Estado de equilibrio químico de las aguas del Grupo II: a) RSC; b) RSD; c) Diagrama de Tillman Tombe; d) SST.



a)



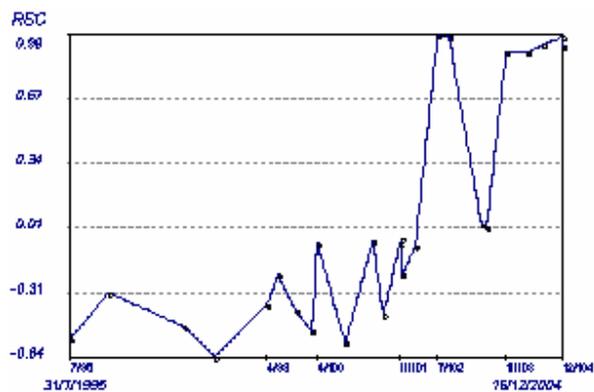
b)



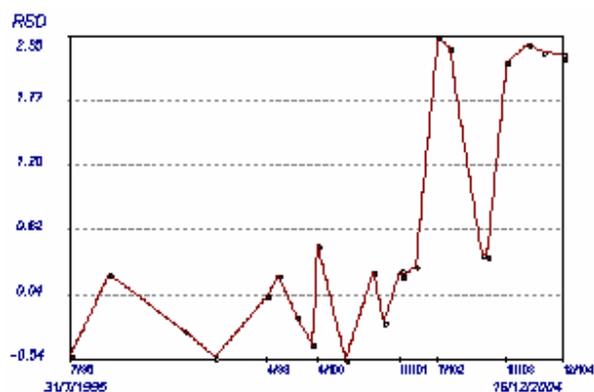
c)

d)

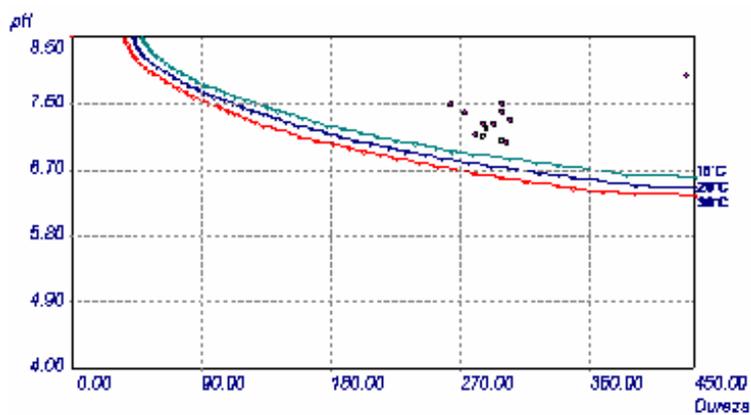
Figura 3.10. Estado de equilibrio químico de las aguas del Grupo III: a) RSC; b) RSD; c) Diagrama de Tillman Tombe; d) SST.



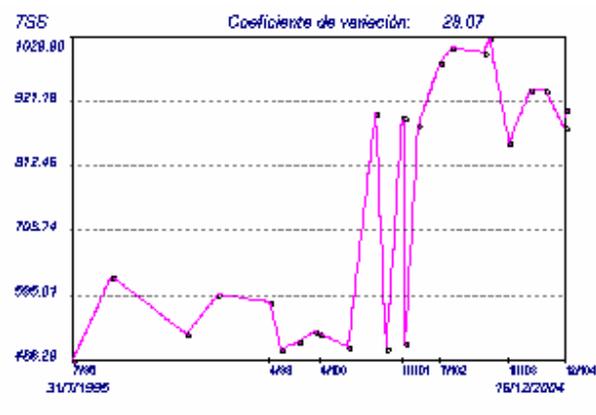
b)



b)



c)



d)

Figura 3.11. Estado de equilibrio químico de las aguas del Grupo IV: a) RSC; b) RSD; c) Diagrama de Tillman Tombe; d) SST.

Los resultados de las series cronológicas de RSC (**figuras 3.10 a y 3.11 a**) y RSD (**figuras 3.10 b y 3.11 b**), del diagrama de Tillman Trombe (**figuras 3.10 c y 3.11 c**) y de las series cronológicas de TSS (**figuras 3.10 d y 3.11 d**), de las aguas subterráneas de los grupos III y IV son similares a los de las aguas del grupo I. Se puede establecer que mientras las aguas superficiales no alcanzan el equilibrio químico en el proceso de interacción agua-roca, las aguas subterráneas tienden a la sobresaturación, lo cual se debe a la diferente modalidad de estos procesos, en el primero no existe suficiente disponibilidad de CO<sub>2</sub>, mientras que en el segundo es abundante, especialmente en el suelo de la zona de alimentación del acuífero.

Por otro lado, el efecto de dilución de las lluvias es más sensible en las aguas superficiales que en las subterráneas, las cuales tienden a recuperarse más rápidamente de este efecto debido al mayor tiempo de residencia del agua en el interior del acuífero y por ende, de interacción con las rocas.

### **3.11 Estimación de la composición química del agua mediante mediciones de conductividad eléctrica y el empleo de modelos de correlación matemática**

Se ha encontrado que existe buena correlación matemática entre la conductividad eléctrica (CE) y algunos indicadores de calidad del agua, tales como la mineralización, **M. Markowicz y M. Pulina (1979); M. Bakalowicz (1974)** y la dureza. **I. G. Bray (1977)**. Sin embargo, correlaciones significativas entre la conductividad eléctrica y la composición iónica sólo se han encontrado para los iones más abundantes. **J. J. Drake y D. C. Ford (1974)**.

Mediante estos métodos estadísticos, en ocasiones se obtienen expresiones que no tienen sentido físico y que dependen de los datos disponibles. Es por ello que algunos especialistas han objetado el valor de este tipo de correlaciones matemáticas entre la concentración iónica (C<sub>i</sub>) y CE, y su aplicación con fines prácticos ha sido limitada. Con el objetivo de encontrar modelos físicos que sirvan de fundamento para la aceptación, por parte de la comunidad científico-técnica, de las relaciones empíricas entre la concentración de los iones individuales (C<sub>i</sub>) y la conductividad eléctrica medida "in situ", se han desarrollado estudios cinéticos, tanto en el laboratorio, **J. R. Fagundo (1990); P. González (1997)**; como en el campo. **J. R. Fagundo et al (1993)**;

**J. R. Fagundo y J. J. Pajón (1987); J. R. Fagundo y J. E. Rodríguez (1995); V. Monteagudo et al (2007c),**

Estos modelos poseen una base geoquímica que se fundamenta en el proceso de adquisición de la composición química de las aguas subterráneas y superficiales naturales en un acuífero o cuenca hidrográfica, donde intervienen la lluvia, los gases y ácidos liberados en el suelo por los microorganismos (CO<sub>2</sub>, ácidos húmicos y fúlvicos) y los minerales constitutivos de las rocas que forman parte del material acuífero). En los experimentos cinéticos de disolución de minerales carbonatados, la conductividad eléctrica medida en el transcurso de la reacción posee una correlación lineal significativa con las concentraciones de los iones HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Ca<sup>2+</sup>, en el caso de una calcita y con las concentraciones de los iones HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> y Mg<sup>2+</sup> en el caso de una dolomita. **J. R. Fagundo (1996); E. Álvarez et al (1996), (tabla 3.15).**

Como criterio de semejanza entre los valores reales y los determinados por modelación matemática estos investigadores han utilizado un índice de similitud (IS), el cual toma en cuenta el conjunto de datos hidroquímicos en lugar del coeficiente

de correlación de cada ion por separado: 
$$IS = \sum_{i=1}^n R_{1i} R_{2i}$$

En la que:  $R_{1i} = \frac{C_{im}}{C_{ir}}$  (si  $C_{im} > C_{ir}$ ) ó  $R_{1i} = \frac{C_{ir}}{C_{im}}$  (si  $C_{im} < C_{ir}$ ), y  $R_{2i} = \frac{C_{im}}{\sum_{i=1}^n C_{ir}}$

Siendo:

$C_{ir}$  : Concentración real del ion i.

$C_{im}$  : Concentración del ion i obtenida por modelación matemática.

En efecto, a partir de los resultados de los experimentos cinéticos realizados en el marco de esta tesis (**tablas 3.14 y 3.15**), se demuestra que las correlaciones entre la concentración de los referidos iones y la conductividad eléctrica son significativas (**tabla 3.16**) y que los IS entre los datos reales y los obtenidos por modelación matemática, para las mediciones realizadas a partir de los 10 minutos de reacción hasta alcanzar el equilibrio químico varían entre 0.964 y 0.998, lo que representa una semejanza entre un 96 y un 99 % respectivamente.

En la **tabla 3.16** se aprecian los valores de las pendientes de las ecuaciones de regresión lineal y del coeficiente de correlación entre la conductividad eléctrica y los iones mayoritarios correspondientes a los experimentos cinéticos de disolución de los carbonatos de la Fm. Vázquez (calcita) y de la Fm. Güines (dolomita), donde los valores de las pendientes y los coeficientes de correlación son superiores en la Fm. Güines que en la Fm. Vázquez. En la **tabla 3.17** se observa un aumento de la conductividad eléctrica en el tiempo para ambas formaciones; sin embargo, esta variación se acentúa para la Fm. Güines; mientras que el índice de similitud oscila entre 0,958 y 0,98.

**Tabla 3.16. Valores de las pendientes de las ecuaciones de regresión lineal y del coeficiente de correlación entre la conductividad eléctrica y los iones mayoritarios correspondientes a los experimentos cinéticos de disolución de los carbonatos de la Fm. Vázquez (Calcita) y la Fm. Güines (Dolomita).**

Ion	Fm Vázquez		Fm Güines	
	m	r	m	r
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,01186	0,997	0,01085	0,999
Cl <sup>-</sup>	0,00070	-	0,00049	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,00000	0	0	0
Ca <sup>2+</sup>	0,01038	0,997	0,00470	0,997
Mg <sup>2+</sup>	0,00024	0,883	0,00464	0,993
Na <sup>+</sup>	0,00193	0,629	0,00200	0,600

**Tabla 3.17. Valores del tiempo de reacción (t), la conductividad eléctrica (CE) y el índice de similitud (IS), correspondientes a los experimentos cinéticos de disolución de los carbonatos de la Fm. Vázquez (Calcita) y la Fm. Güines (Dolomita).**

No	t (h:m)	Fm Vázquez		t (h:m)	Fm Güines	
		CE ( $\mu\text{S}/\text{com}$ )	IS		CE ( $\mu\text{S}/\text{com}$ )	IS
1	0:10	119	0.958	0:10	153	0.964
2	0:20	144	0.972	0:15	177	0.973
3	0:25	151	0.973	0:20	194	0.986
4	0:30	157	0.980	0:25	206	0.988
5	0:35	162	0.986	0:30	216	0.991
6	0:40	175	0.983	0:35	223	0.991
7	0:45	186	0.993	0:40	229	0.993
8	0:50	211	0.964	0:45	242	0.993
9	0:55	224	0.984	0:50	249	0.990
10	1:00	224	0.981	0:55	255	0.984
11	1:30	225	0.974	1:00	257	0.970
Media			0.977			0.984

En la **tabla 3.18** se presentan los ficheros de datos utilizados para determinar las ecuaciones de regresión ajustadas y los utilizados para la validación de los modelos matemáticos. Para ambos propósitos, se utilizaron datos correspondientes a muestreos realizados en distintos intervalos de tiempo, aunque con posterioridad se puedan obtener nuevas ecuaciones, más representativas, uniendo ambos ficheros con el objetivo de tener un número mayor de datos en los nuevos ajustes.

**Tabla 3.18. Datos de los sitios de muestreo utilizados para la determinación y validación de los modelos de correlación matemática. Provincia de Las Tunas**

Cuenca	Ficheros de Validación		Ficheros de Modelación		
	Sitio de muestreo	Periodo de muestreo	N	Período de muestreo	N
Tunas Norte	P-87	10/04/77-29/04/93	93	28/04/94-07/11/01	7
	P-104	26/01/76-11/11/93	133	28/04/94-29/10/02	10
	P-175	06/01/75-09/11/94	62	14/03/96-13/11/02	6
	El Cocal II	03/02/01-16/05/02	18	04/02/03-10/08/03	7
	P-19	04/03/83-31/10/89	39	26/01/90-07/12/04	9
	Acueducto Manatí	05/01/00-23/12/02	21	27/03/03-11/07/03	3
	P-105	09/12/74-25/10/90	28	25/01/91-31/10/94	6
Sur de Las Tunas	Las Maboas	02/01/01-25/12/01	12	02/03/02-08/12/02	10
	Carretera Amancio	27/12/78-07/10/00	40	10/04/01-05/11/04	6
Macizo Hidrogeológico del Cretácico	Presa Rincón	27/12/78-05/09/00	70	28/03/01-05/08/03	11
	Presa Cayojo I	22/10/81-07/11/94	136	28/10/95-25/04/01	11
	P-248	01/05/91-07/12/97	52	23/03/99-04/04/03	8
	Central Jobabo	20/10/93-30/04/99	14	04/03/00-14/10/03	9
	Alba Flores	01/05/02-07/08/03	19	08/10/03-03/12/04	6

Los modelos matemáticos empleados fueron los siguientes:

1. Ecuación de una línea recta con intercepto cero:  $y = b_1X$ .
2. Ecuación polinómica de segundo grado (parábola) que pasa por el origen de coordenadas:  $y = b_1X + b_2X^2$ .
3. Ecuación de una línea recta con intercepto distinto de cero:  $y = b_0 + b_1X$ .

Los sitios de muestreo de la provincia de Las Tunas utilizados en estos estudios, fueron aquellos que contaban con un número de datos representativos de las fluctuaciones del ciclo hidrológico (al menos 12 datos).

En la **tabla 3.19** se presentan, para cada sitio muestreado, los valores de de las pendientes de las ecuaciones de regresión y los valores de los coeficientes de correlación ( $r$ ) correspondientes a cada ion, para los modelos matemáticos ajustados. En general, los valores más altos de  $r$  se obtienen para aquellos iones que más contribuyen a la conductividad eléctrica (CE), que como se ha indicado con anterioridad en esta tesis (capítulo de Revisión Bibliográfica), esa magnitud está relacionada casi linealmente con la sumatoria del producto de de las concentraciones de cada ion ( $C$ ) con la conductividad específica de los mismos a dilución infinita ( $S$ ):

$$CE = \sum_{i=1}^n \alpha_i (C_i S_i)^f$$

En la cual:  $\alpha_i$  la fracción de iones libre y  $f$  un factor exponencial empírico con valor cercano a la unidad.

Si bien en ocasiones los valores de  $r$  obtenidos para un ion determinado no son significativos, especialmente en los casos en que su contenido es muy pequeño, el índice de similitud entre los datos reales y los estimados por modelación matemática, sí son por lo general altos. Los IS correspondientes a los modelos de mejor ajuste variaron entre 0,819 y 0,946, lo que representa una semejanza entre 82 y 95 % respectivamente.

**Tabla 3.19. Modelos de correlación matemática entre la conductividad eléctrica ( $\mu\text{S/cm}$ ) y las concentraciones iónicas ( $\text{meq/L}$ ) y el TSS ( $\text{mg/L}$ ) de los sitios estudiados en las Tunas.**

Sitio de muestreo	y	$y = b_1X$		$y = b_1X + b_2X^2$			$y = b_0X + b_1X$		
		$b_1$	[r]	$b_1$	$b_2 * 10^6$	[r]	$b_0$	$b_1$	[r]
P-87	$\text{HCO}_3^-$	0.00635	0.560	0.00903	-2.37086	0.778	3.9824	0.0023	0.564
	$\text{Cl}^-$	0.00265	0.750	0.00265		0.750	-0.2960	0.0012	0.920
	$\text{SO}_4^{2-}$	0.00087	0.574	0.00059	0.02421	0.953	-0.2960	0.0012	0.995
	$\text{Ca}^{2+}$	0.00428	0.100	0.00659	-2.03907	0.482	3.5595	0.0007	0.191
	$\text{Mg}^{2+}$	0.00245	0.715	0.00190	0.49228	0.747	-0.9089	0.0034	0.745
	$\text{Na}^+$	0.00321	0.748	0.00321		0.747	-2.1676	0.0054	0.825
P-104	$\text{HCO}_3^-$	0.00727	0.812	0.00798	-0.83089	0.816	0.4011	0.0068	0.814
	$\text{Cl}^-$	0.00211	0.667	0.00072	1.61273	0.728	-0.9478	0.0032	0.713
	$\text{SO}_4^{2-}$	0.00069	0.251	0.00099	-0.35735	0.310	0.1820	0.0005	0.492
	$\text{Ca}^{2+}$	0.00502	0.337	0.00781	-3.24098	0.562	1.7534	0.0029	0.472
	$\text{Mg}^{2+}$	0.00231	0.469	0.00257	-0.30590	0.472	0.2271	0.0020	0.622
	$\text{Na}^+$	0.00293	0.535	-0.00136	4.86661	0.681	-2.7693	0.0062	0.935
P-175	$\text{HCO}_3^-$	0.00655	0.027	0.01286	-2.97843	0.027	13.4369	0.0002	0.027
	$\text{Cl}^-$	0.00265	0.056	0.00264		0.056	6.0220	-0.0002	0.056
	$\text{SO}_4^{2-}$	0.00109	0.242	-0.00048	0.73695	0.269	-1.7776	0.0019	0.269
	$\text{Ca}^{2+}$	0.00055	0.090	0.00054		0.091	0.9006	0.0001	0.091
	$\text{Mg}^{2+}$	0.00167	0.070	0.00322	-0.73428	0.076	4.1350	-0.0003	0.076
	$\text{Na}^+$	0.00836	0.500	0.00836		0.509	11.4000	0.0029	0.509
El Cocal II	$\text{HCO}_3^-$	0.00658	0.012	0.01396	-3.16728	0.209	15.4971	-0.0001	0.012
	$\text{Cl}^-$	0.00509	0.159	0.01079	-2.44821	0.159	12.472	-0.0003	0.159
	$\text{SO}_4^{2-}$	0.00083	0.009	0.00190	-0.46150	0.144	1.9916	-0.00005	0.009
	$\text{Ca}^{2+}$	0.00137	0.414	0.00405	-1.14870	0.412	5.8449	-0.0012	0.414
	$\text{Mg}^{2+}$	0.00320	0.527	0.00085	1.010053	0.518	-5.7014	0.0057	0.527
	$\text{Na}^+$	0.00793	0.397	0.02176	-5.93828	0.429	29.8173	-0.0049	0.397

**Tabla 3.19. (Continuación)**

Sitio de muestreo	y	y = b <sub>1</sub> X		y = b <sub>1</sub> X + b <sub>2</sub> X <sup>2</sup>			y = b <sub>0</sub> X + b <sub>1</sub> X		
		b <sub>1</sub>	[r]	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub> *10 <sup>6</sup>	[r]	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	[r]
P-19	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.00534	0.839	0.00497	0.30002	0.841	-0.0943	0.0054	0.839
	Cl <sup>-</sup>	0.00300	0.750	0.00282	0.14819	0.751	-0.1732	0.0031	0.751
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.00127	0.400	0.00200	-0.60433	0.479	0.8065	0.0006	0.443
	Ca <sup>2+</sup>	0.00265	0.300	0.00434	-1.40374	0.448	1.6676	0.0012	0.356
	Mg <sup>2+</sup>	0.01227	0.238	0.00161	-0.32139	0.259	0.2992	0.0010	0.248
	Na <sup>+</sup>	0.00573	0.746	0.00384	1.56736	0.775	-1.4262	0.0070	0.758
Acueducto Manatí	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.00942	0.096	0.02043	-4.71816	0.090	26.3905	-0.0019	0.096
	Cl <sup>-</sup>	0.00593	0.224	0.01830	-0.53043	0.233	28.3914	-0.0063	0.224
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.00136	0.005	0.00327	-0.81669	0.073	4.2812	-0.0005	0.005
	Ca <sup>2+</sup>	0.00071	0.128	0.00061	0.04595	0.128	-0.2829	0.0008	0.128
	Mg <sup>2+</sup>	0.00157	0.094	0.00396	-1.02155	0.116	5.3832	-0.0007	0.094
	Na <sup>+</sup>	0.01525	0.246	0.03770	-9.62355	0.231	52.4117	-0.0072	0.246
P-105	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.00544	0.140	0.01177	-5.79645	0.445	6.6133	-0.0008	0.149
	Cl <sup>-</sup>	0.00288	0.667	-0.00038	2.98974	0.803	-3.4745	0.0062	0.793
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.00094	0.517	-0.00015	1.00279	0.629	-1.1119	0.0020	0.612
	Ca <sup>2+</sup>	0.00442	0.198	0.00644	-1.84797	0.416	2.1602	0.0042	0.404
	Mg <sup>2+</sup>	0.00198	0.402	0.002307	-0.29746	0.412	0.3821	0.0016	0.413
	Na <sup>+</sup>	0.00309	0.412	0.00272	0.33740	0.414	-0.6039	0.0037	0.417
Las Maboas	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.00788	0.630	0.02303	-10.56754	0.540	22.0416	-0.0075	0.538
	Cl <sup>-</sup>	0.00337	0.550	0.00247	0.62766	0.563	-1.2877	0.0043	0.562
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.00077	0.662	0.00045	0.21997	0.693	-0.4590	0.0011	0.694
	Ca <sup>2+</sup>	0.00482	0.110	0.01004	-3.64251	0.119	7.6178	-0.0005	0.164
	Mg <sup>2+</sup>	0.00367	0.100	0.00788	-2.93133	0.173	6.0419	-0.0005	0.109
	Na <sup>+</sup>	0.00353	0.060	0.00804	-3.14650	0.063	6.6352	-0.0011	0.078

**Tabla 3.19 (Continuación)**

Sitio de muestreo	y	y = b <sub>1</sub> X		y = b <sub>1</sub> X + b <sub>2</sub> X <sup>2</sup>			y = b <sub>0</sub> X + b <sub>1</sub> X		
		b <sub>1</sub>	[r]	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub> *10 <sup>6</sup>	[r]	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	[r]
Carretera Amancio	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.00542	0.030	0.00803	-0.16442	0.523	8.5041	0.0001	0.031
	Cl <sup>-</sup>	0.00393	0.750	0.00068	1.97419	0.868	-4.5881	0.0068	0.830
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.00084	0.482	0.00029	0.33812	0.538	-0.7871	0.0013	0.526
	Ca <sup>2+</sup>	0.00246	0.311	0.00305	-0.35542	0.351	1.4781	0.0015	0.391
	Mg <sup>2+</sup>	0.00244	0.210	0.00546	-1.83365	0.217	5.8337	-0.0012	0.217
	Na <sup>+</sup>	0.00529	0.718	0.00301	1.38503	0.757	4.1914	0.0079	0.762
Presa Rincón	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.00578	0.669	0.00716	-2.01310	0.704	0.6777	0.0047	0.689
	Cl <sup>-</sup>	0.00418	0.823	0.004184		0.823	-1.2642	0.0062	0.873
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.00059	0.207	0.007589	-0.24637	0.207	0.0268	0.0005	0.208
	Ca <sup>2+</sup>	0.00254	0.200	0.00252		0.200	1.0827	0.0008	0.200
	Mg <sup>2+</sup>	0.00218	0.505	0.00218		0.505	-0.3012	0.0027	0.514
	Na <sup>+</sup>	0.00354	0.845	0.00354	3.38637	0.888	-1.3412	0.0080	0.878
Presa Cayojo I	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.00488	0.907	0.00504	-0.13131	0.908	-0.0086	0.0049	0.907
	Cl <sup>-</sup>	0.00394	0.923	0.00394		0.923	-0.0628	0.0040	0.923
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.00077	0.808	0.00047	0.25915	0.866	-0.3523	0.0012	0.895
	Ca <sup>2+</sup>	0.00188	0.200	0.00188		0.200	0.7063	0.0010	0.571
	Mg <sup>2+</sup>	0.00173	0.781	0.00020	-0.20757	0.809	0.2930	0.0013	0.827
	Na <sup>+</sup>	0.00615	0.952	0.00615		0.952	-1.4007	0.0080	0.987
P-248	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.00575	0.570	0.00702	-2.01806	0.594	0.8171	0.0045	0.596
	Cl <sup>-</sup>	0.00809	0.781	0.00883	-1.17924	0.785	0.4589	0.0074	0.785
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.00164	0.313	0.00139	3.90554	0.315	-0.2002	0.0020	0.317
	Ca <sup>2+</sup>	0.00489	0.397	0.00596	-1.68880	0.413	0.6774	0.0038	0.414
	Mg <sup>2+</sup>	0.00527	0.400	0.01737	-19.23293	0.411	7.4241	-0.0065	0.400
	Na <sup>+</sup>	0.00531	0.505	-0.00609	18.11640	0.689	-7.0257	0.0165	0.687

**Tabla 3.19 (Continuación)**

Sitio de muestreo	y	y = b <sub>1</sub> X		y = b <sub>1</sub> X + b <sub>2</sub> X <sup>2</sup>			y = b <sub>0</sub> X + b <sub>1</sub> X		
		b <sub>1</sub>	[r]	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub> *10 <sup>6</sup>	[r]	b <sub>0</sub>	b <sub>1</sub>	[r]
Central Jobabo	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.0056	0.781	0.00551	0.06903	0.781	-0.2543	0.0058	0.781
	Cl <sup>-</sup>	0.00517	0.340	0.01008	-2.78276	0.400	7.6078	0.0008	0.202
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.00066	0.237	0.00137	-0.40065	0.237	1.0098	0.0001	0.060
	Ca <sup>2+</sup>	0.00388	0.026	0.01018	-3.56684	0.263	10.6986	-0.0022	0.435
	Mg <sup>2+</sup>	0.00244	0.651	0.00480	-1.33675	0.597	3.6975	0.0003	0.286
	Na <sup>+</sup>	0.00053	0.452	0.00441	0.48581	0.456	-1.6678	0.0062	0.458
Alba Flores	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.01344	0.500	0.02092	-9.72878	0.558	5.6297	0.0061	0.558
	Cl <sup>-</sup>	0.00372	0.562	-0.001479	6.75032	0.689	-3.9093	0.0088	0.689
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.00151	0.327	0.00032	1.55515	0.363	-0.9425	0.0027	0.366
	Ca <sup>2+</sup>	0.00418	0.300	0.01496	-10.40317	0.362	7.9374	-0.0062	0.341
	Mg <sup>2+</sup>	0.00432	0.260	0.01338	-11.78608	0.287	6.7082	-0.0044	0.270
	Na <sup>+</sup>	0.01017	0.556	-0.00858	24.39391	0.730	-13.8677	0.0283	0.725

Los resultados de la **tabla 3.19**, que pueden mejorarse aún más, seleccionándose para cada ion, el modelo de mejor ajuste y utilizando el total de datos (la suma de los ficheros usados para la creación de los modelos y los ficheros utilizados para la validación), indican que es posible estimar de la calidad de las aguas de la provincia, en términos de concentración iónica (también del TSS y dureza en los casos de buena correlación), mediante mediciones de conductividad eléctrica y del empleo de las correspondientes ecuaciones matemáticas de mejor ajuste para cada sitio de muestreo. En la **tabla 3.20** se muestran los valores de los índices de similitud encontrados entre los datos reales y los estimados por modelación con los datos utilizados para la validación de los modelos de correlación matemática en Las Tunas. Se tomaron dos series de datos diferentes para que los resultados obtenidos por modelación fueran determinados con datos hidroquímicos distintos a los utilizados para la validación de los modelos.

Simplemente se separaron los datos a partir de una determinada fecha, de modo que hubiera más datos para la obtención de las ecuaciones de correlación matemática que para la validación, con el objetivo de que fueran más confiables los modelos matemáticos. Los datos disponibles corresponden a diferente tamaño de muestra y a períodos de muestreo diferentes, por lo que no se pudo seleccionar datos hidroquímicos con igual número y período de muestreo, que hubiera sido lo ideal.

**Tabla 3.20. Valores de los índices de similitud encontrados entre los datos reales y los estimados por modelación con los datos utilizados para la validación de los modelos de correlación matemática. Provincia Las Tunas**

Sector hidrogeológico	Sitio muestreado	IS		
		$y = b_1X$	$y = b_1X + b_2X^2$	$y = b_0 + b_1X$
Tunas Norte	P-87	<b>0.836</b>	0.827	0.817
	P-104	0.818	0.818	<b>0.834</b>
	P-175	0.846	0.851	<b>0.853</b>
	El Cocal II	0.853	0.877	0.874
	P-19	0.819	<b>0.842</b>	0.841
	Acueducto Manatí	<b>0.889</b>	<b>0.889</b>	0.879
	P-105	0.757	<b>0.833</b>	0.790
Sur de Las Tunas	Las Maboas	0.850	0.866	<b>0.867</b>
	Carret. Amancio	0.808	<b>0.867</b>	0.834
Macizo Hidrogeológico del Cretácico	Presa Rincón	0.816	0.818	<b>0.819</b>
	Presa Cayojo I	0.817	0.823	<b>0.859</b>
	P-248	0.931	0.921	<b>0.946</b>
	Central Jobabo	0.873	0.843	<b>0.857</b>
	Alba Flores	0.893	0.925	0.922

Estos resultados pueden contribuir al desarrollo futuro de un sistema automatizado para el monitoreo de la calidad del agua de las fuentes de abasto de la provincia, mediante el empleo de ecuaciones de correlación matemática y mediciones de conductividad eléctrica.

## CONCLUSIONES

Las aguas subterráneas en Las Tunas presentan un elevado contenido de minerales disueltos, las de tipo superficial son menos mineralizadas; la composición de estas aguas evoluciona, en presencia de calizas dolomitizadas o serpentinitas:  $\text{Cl}^- \text{-Na}^+ \rightarrow \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{-Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ \rightarrow \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{-Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{-Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- \text{-Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ , y en presencia de calizas, calcarenitas y areniscas:  $\text{Cl}^- \text{-Na}^+ \rightarrow \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- \text{-Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$ , por lo que predominan las aguas hidrogenocarbonatadas cloruradas y cloruradas hidrogenocarbonatadas calcicas magnésicas sódicas y mixtas con respecto a los cationes. Un rasgo característico en la composición de estas aguas es el alto contenido de cloruro y sodio debido a diversas causas; salinidad del suelo, aportes de aguas procedentes del substrato rocoso e intrusión marina.

Los patrones hidrogeoquímicos originales del agua en Las Tunas, son difíciles de interpretar en función del proceso de interacción agua-roca; al extraer el contenido de cloruro de sodio se obtienen patrones hidrogeoquímicos típicos de las aguas que reaccionan con los minerales constitutivos de los acuíferos y se distinguen cuatro grupos de agua atendiendo al contenido relativo de los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ ; Grupo I ( $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ ); Grupo II ( $\text{Na}^+$ ;  $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ ); Grupo III ( $\text{Na}^+$ ;  $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ ); Grupo IV ( $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ ).

Mediante experimentos cinéticos de disolución de carbonatos de las formaciones geológicas Vázquez y Güines, en condiciones de sistema cerrado respecto al  $\text{CO}_2$ , se obtiene un mismo patrón hidrogeoquímico, a partir de los diez minutos de reacción, típico de una calcita y una dolomita respectivamente, lo que evidencia que solo los iones hidrogenocarbonato, calcio y magnesio son aportados por el material acuífero.

El origen de la composición química de las aguas se explica mediante procesos geoquímicos de disolución de halita, calcita, dolomita (o serpentinita)

y plagioclasa, en diferentes proporciones, que dependen de la litología drenada.

Mediante experimentos de lavado de suelos de la provincia con agua destilada, se demuestra que las aguas meteóricas que se infiltran por los mismos, llegan a adquirir hasta 80,7 % de  $\text{Cl}^-$  y 57,0 % de  $\text{Na}^+$  en los primeros 25 cm de profundidad, lo que indica que en una parte importante de la salinidad del agua subterránea se adquiere en la zona del suelo. Los experimentos de interacción agua-roca realizados en el laboratorio demuestran que en este proceso sólo se originan los iones correspondientes a la disolución los carbonatos, por lo que se concluye que el agua subterránea adquiere, principalmente, el contenido de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  en la zona no saturada de los acuíferos (zona del suelo) y  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  en la zona saturada de los mismos.

Mediante el análisis de series cronológicas ponen de manifiesto una gran variabilidad de la composición en las aguas superficiales y subterráneas asociadas a los acuíferos carbonatados de tipo cavernoso. En los acuíferos desarrollados en tobas, areniscas y calcarenitas, de tipo más poroso, se obtienen valores de coeficientes de variación de SST más bajos, lo que indica una mayor estabilidad de la composición ante el efecto del ciclo hidrológico.

Las aguas subterráneas suelen estar más tiempo en estado de sobresaturación respecto a los minerales calcita y dolomita que las de tipo superficial, alcanzando las primeras el equilibrio químico con un mayor contenido de dureza. Ello se debe a la mayor disponibilidad de  $\text{CO}_2$  en el caso de las aguas subterráneas. En Las Tunas, el efecto salino origina que los equilibrios químicos con respecto a la calcita y la dolomita se alcancen con un alto contenido de  $\text{CaCO}_3$  disuelto.

En los experimentos de simulación del proceso de adquisición de la composición química de las aguas que drenan carbonatos, se obtienen

correlaciones significativas entre la conductividad eléctrica y las concentraciones de los iones hidrogenocarbonato, calcio y magnesio, mediante el modelo de la línea recta que pasa por el origen de coordenadas. Estos experimentos sirven de base para el empleo de modelos matemáticos en la estimación de la composición química de las aguas de la provincia, a través de mediciones de conductividad eléctrica y el uso de modelos matemáticos específicos para cada fuente.

Las estimaciones realizadas en aguas de abasto de la localidad, utilizando diferentes modelos matemáticos presentan un valor de similitud media (IS) que varía entre 0,819 y 0,946, lo que representa una semejanza entre 82 y 95 % respectivamente. Estos resultados demuestran que es posible utilizar las correspondientes ecuaciones matemáticas, para el monitoreo de la calidad hidroquímica de las aguas de Las Tunas.

## **RECOMENDACIONES**

1. La realización de estudios más precisos, que incluyan a otras fuentes de agua de la provincia de Las Tunas no contempladas en esta investigación y que permitan analizar los procesos geoquímicos identificados, para evaluar con mayor rigurosidad el procedimiento empleado y la metodología propuesta con el propósito de elevar la efectividad en la gestión del recurso natural agua y su empleo con calidad en las actividades socioeconómicas locales.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Acevedo del Monte, R. (1991). Físico-Química. La Habana. Ed. Pueblo y Educación. 3 t.

Aguirre Hernández, A. (2004). Observadores pluviométricos voluntarios: sostenibilidad de las redes hidrológicas en Cuba. Revista Voluntad Hidráulica. Número 96: 3-9. La Habana. Ed. INRH. ISSN-0505-9461.

Álvarez, E. (1998). Sistema de computación para la caracterización hidrogeoquímica y el control de la calidad de las aguas naturales en acuíferos y cuencas hidrográficas. Tesis de Doctor en Ciencias Geográficas. Facultad de Geografía, U.H. Ciudad de La Habana.

Álvarez, E., I. Vinardell, J.R. Fagundo, E. Reguera. M.E. Cardoso (1990). Control de la calidad de las aguas mediante un sistema automatizado. Estudios Geológicos (Madrid), 46 (5-6): 409-414.

Álvarez E. J. R. Fagundo. (1995). SIMUCIN: sistema para el estudio cinético y la modelación de reacciones de disolución de minerales. En: El Karst y los Acuíferos Kársticos, pp. 209-213. Ed. Universidad de Granada.

Álvarez, E., J. R. Fagundo, P. González, V. Ferrera, G. Benítez. (1996). Aplicación de métodos de simulación química y matemática al estudio de la disolución de carbonatos en diferentes condiciones experimentales:. En: Contribuciones a la hidrogeología y medio ambiente en Cuba, pp. 152-157. La Habana.

Antigüedad I. (1997). Un medio particular: el medio kárstico. En: Curso Avanzado sobre Contaminación de Aguas Subterráneas. Monitoreo, Evaluación y Recuperación. Universidad de Pinar del Río. (1): 158-166. Ed. Universidad Jaime I, Castellón. España

APHA, AWWA, WPCF, (1989). Standard methods for the examination of Water and Wastewater. Ed. American Public Health Association, Washington. pp. 17, 1.5-3.12.

Appelo C. A. J. and D. Postma. (1993). Geochemistry, Groundwater and Pollution. Netherlands. Ed. Balkema.

Back, W, Cherry, R. N and Hanshaw, B. B. (1966). Chemical equilibrium between the water and minerals of a carbonate aquifer. Nat. Speleol. Soc. Bull, 28 (3): 119-126..

Bakalowicz, M. (1974). Géochimie des eaux d' aquifères karstiques.I- Relation entre mineralisation et conductivité, Ann Spéléolog. 29 (2): 167-173.

Ball J. W. and Nordstrom D. K (1991). User manual for WATEQ4F, with revised thermodynamic data base and test case for calculating speciation of major, trace and redox elements in natural waters. U.S. Geol. Survey, Open File Report: 91-83.

Beato Mesa, O. (2008). Caracterización Hidroquímica de las Cuencas M-I y M-II de la Provincia de Matanzas. Tesis de Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Facultad de Geografía. Universidad de La Habana.

Beato Mesa, O. y J. R. Fagundo Castillo (2004). Mecanismos de reacción mediante los cuales el agua adquiere su composición química, pp. 23. La Habana (Material Impreso).

Beato. O. y J.R. Fagundo. (2006). Estudio de la propiedades físicas y químicas de las aguas naturales. La Habana, pp. 13. Ed. INRH.

Berner R. A. and J.W. Morse. 1974. Dissolution kinetics of calcium carbonate. Am. J. Sci. 274: 108-131.

Bray, L. G. (1977). Rapid aggressiveness assessment using conductimetry. Proceeding of the 7 th International Speleological Congress, Scheffield, pp: 61-71.

Comton, R.G. and P.R. Unwin (1990). The dissolution of calcite in aqueous solution at pH < 4; kinetics and mechanism. Phil Trans. R. Soc. London A, 330: 1-45.

Coth, (2000). Procesos Geológicos Externos.

<http://htmlrincondelvago.com/agentes-geologicos-externos.html>

Curl, R. (1965). Solution Kinetics of Calcite. Proc. 4th Intern. Congress Speleolol. Ljubijana 1965, 3: 61-66.

Custodio, E. y R. Llamas. (1986). Hidrogeología Subterránea. Barcelona. Ed. Omega.

Davis y De West (1966). Características físico-químicas de las aguas naturales: principales componentes. En Beato. O y Fagundo, J. R. (2004), pp. 21. La Habana. Ed. INRH.

De Miguel, F.C. (1994). Hidrogeología y quimismo del Valle del Cauto en la provincia de Holguín y Las Tunas. Holguín.

De Miguel, F.C. (2003). Hidrogeología Ambiental. Moa. Ed. IMMM. pp. 120 (Material Impreso).

-Drake J.J. and D.C. Ford (1974). Hydrochemistry of the Athabasca and North Saskatchewan River in the Rocky Mountains of Canada. Water Resources Research, 10 (6): 1 192-1 198.

Hernández Espinosa, Maydelín. (2002). Caracterización hidroquímica de la Cuenca Sur de Pinar del Río. Tesis (Master en Geografía, Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial). Universidad. La Habana, 70 pp.

Ettazarin, S. (2004). Incidentes of water-rock interaction on natural resources characters. En: Environmental Geology, 69-75 pp. Springer-Verlag. ISSN: 0943-0105.

Fagundo, J. R. (1990 a). Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. Efecto de los factores geológicos, hidrogeológicos y ambientales. Hidrogeología. Granada, 5: 33-46.

Fagundo J. R. (1990 b). Evolución química y relaciones empíricas en aguas naturales. Estudio mediante simulación química del efecto de la litología. Revista Voluntad Hidráulica, 82: 28-37. La Habana.

Fagundo J. R. (1996 a). Química del Agua Kárstica. En Hidroquímica del Karst. Granada: pp. 11-119. Ed. Grupo de Investigación de Recursos Hídricos y Geología Ambiental,

Fagundo, J. R. (1996 b). Procesos hidrogeoquímicos y calidad de las aguas. Contribución a la Hidrología y el Medio Ambiente en Cuba. La Habana, pp. 177- 198. Ed. J. R. Fagundo, D. Pérez Franco, J. M. García, A. Álvarez-Nodarse, I. Morell.

Fagundo, J. R. (1998). Patrones hidrogeoquímicos y relaciones matemáticas en aguas naturales. *Revista Ingeniería Hidráulica*. La Habana, 19 (2): 62-78. ISSN 0253-0678.

Fagundo J. R. y J. M. Pajón. (1985). Contribución al estudio de las relaciones lineales entre contenidos iónicos y parámetros químico-físicos. Efecto de la litología. *Revista Ingeniería Hidráulica*. La Habana, 6 (1): 12-29.

Fagundo, J. R. and Rodríguez, J. E. (1991). Hydrogeochemical pattern and mathematical correlations in karst at the examples of Cuba. *Proc. of the Int. Conference Environmental Changes in Karst Areas*. IGU-UIS, Italy 1991. *Quaderni del Dipartimento di Geografia* No 13, 361-369.

Fagundo, J. R., J. E. Rodríguez, J. M. Pajón, E. Franco, G. Benítez, A. C. Rodríguez, J. Güerón e I. Abelló. (1993). Caracterización hidroquímica de las aguas del Pan de Güajaibón y otras áreas cársicas cercanas a la Sierra del Rosario. I Taller sobre Cuencas Experimentales en el Karst. Matanzas, 1992, pp. 43-53. Ed. Univ. Jaime I, Castellón. España.

Fagundo, J. R. y J. E. Rodríguez. (1995). Contribución al conocimiento hidrodinámico de los sistemas cársicos del Pan de Guajaibón y la meseta del Guaso a partir de datos hidroquímicos durante las crecidas. En: "El Karst y los acuíferos Kársticos, ejemplos y métodos de estudio", pp. 119-135. Ed. A. Pulido-Bosch, J. R. Fagundo y J. Rodríguez. Univ. Granada. España.

Fagundo, J.R., P. González, M. Suárez Muñoz, J. Fagundo-Sierra, C. Melián, E. Alvarez. *HIDROGEOQUIM* (2005 a). Contribución a la Educación y Protección Ambiental. ISCTN. Vol 6 (XI Taller), Q 58-67. ISBN 959-7136-35-X.

Fagundo, J.R., P. González, E. Alvarez, G. Tillán, I. Vinardell, J. Fagudo Sierra, M. Suárez, Cl. Melián (2005 b). Solución de problemas ambientales mediante la modelación hidrogeoquímica. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*. V 36, Número Especial, 31 pp. ISSN 0258-6002.

Fagundo, J.R., P. González, M. Suárez, L. Sánchez, B. Peña, J. Fagundo-Sierra (2006). Metodología para la Caracterización Hidrogeoquímica de Sistemas

Hidrotermales. Aplicación al Sistema San Diego de los Baños - Los Bermejales, Pinar del Río, Cuba. En: Contribución al conocimiento geológico, hidrogeológico, ambiental y del termalismo en la Sierra del Rosario. J.R. Fagundo, I. Antigüedad, P. González, C. Melián, M. Suárez (editores). CD editado por: Productos y Servicios Geográficos (GEOTECH), pp. 21. ISBN 959-7167-10-7.

Fagundo, J.R., P. González, J. Fagundo Sierra, E. Alvarez, M. Suárez, Cl. Melián (2006 a). Application of hidrogeochemical modeling to characterization and water quality control of coastal karst aquifer. In: Climate Variability and Change Hydrological impacts. Ed.: S. Demuth, A. Gustard, E. Planos, F. Scatena, E. Servat. IAHS Publication 308: 596-600. Printed in The Netherlands. ISSN 0144-7815.

Fagundo, J.R., P. González, J. Fagundo-Sierra, M. Suárez, C. Melián (2006 b). Metodología para el control automatizado de la calidad de las aguas en acuíferos, cuencas y yacimientos de aguas minerales y mineromedicinales. En: Contribución al conocimiento geológico, hidrogeológico, ambiental y del termalismo en la Sierra del Rosario. J.R. Fagundo, I. Antigüedad, P. González, C. Melián, M. Suárez (editores). CD editado por: Productos y Servicios Geográficos (GEOTECH), pp. 151. ISBN 959-7167-10-7.

Fagundo Castillo, J.R., V. Monteagudo Zamaora, M. Rodríguez-Piña, T. Leonarte Pérez, P. González Hernández, M. Suárez Muñoz, C. Melián Rodríguez, A. Abraham Alonso (2007a). Geoquímica de las aguas subterráneas que drenan carbonatos del intervalo Jurásico-Paleógeno. VII Congreso de Geología (GEOLOGIA 2007). Geomorfología, Carso e Hidrogeología. Segunda Convención Cubana de Ciencias de la Tierra. Memorias en CD-Rom, pp. La Habana GEO5-04: pp. 675-702. ISBN 978-959-7117-16-2.

Fagundo Castillo, J.R., V. Monteagudo Zamaora, M. Rodríguez Piña, T. Leonarte Pérez, O. Beato Mesa, P. González Hernández, M. Suárez Muñoz, C. Melián Rodríguez, A. Abraham Alonso (2007b). Patrones hidrogeoquímicos y origen de la composición química de aguas subterráneas que drenan carbonatos. Memorias del

VIII Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica, Editorial Obras, pp. 22. ISBN: 978-959-247-036-1.

Fagundo Castillo, J.R (2007c). Contribuciones al Desarrollo de la Hidrogeoquímica. CD-Rom editado por: Productos y Servicios Geográficos (GEOTECH). Instituto de Geografía Tropical. La Habana. ISBN 978-959-7167-13-6.

Fagundo-Sierra, J., J.R. Fagundo, P. González, M. Suárez (2001). Modelación de las aguas naturales. Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, Vol. 2, 136-139. ISCTN. ISBN 959-7136-09-0

Fagundo-Sierra, J., J.R. Fagundo, P. González, M. Suárez, C. Melián (2002). Sistema de base de datos de aguas minerales y mineromedicinales (TERMADAT). Contribución a la Educación y la Protección Ambiental, Vol. 3 (VIII Taller), 6 pp. ISCTN. ISBN 959-7136-13-9.

Feria Ávila, Hernan. (2004). Estudio de las variables climáticas de la provincia Las Tunas. Las Tunas, pp. 17.

Ferrera León, V. (1997). Caracterización hidrogeoquímica del acuífero de la Ciénaga de Zapata (Matanzas, Cuba). Maestría en Ciencias del Agua. CNIC.

Garrels, R.M. and F.T. Mackenzie (1967). Origin of the chemical compositions of some springs and lakes. Equilibrium Concepts in Natural Water Systems. Am.Chem. Soc. Adv. Chem. Ser. 67: 222-242.

González, P. (1997). Estudio a escala de laboratorio de los procesos de interacción agua-roca. Tesis (Maestro en Ciencias del Agua). CNIC. La Habana.

González Hernández, P. (2003). Contribución al Conocimiento Hidroquímico de Acuíferos Cársicos Costeros con Intrusión Marina. Sector Güira-Quivicán. La Habana. 109 pp. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnica, Geología y Minería. ISJAE. La Habana.

González, P., V. Ferrera, G. Benítez, J. R Fagundo y L. Sánchez. (1996). Estudios experimentales de la disolución de roca carbonatada en condiciones de mezcla con

agua dulce-agua de mar. Contribución a la Hidrología y Medio Ambiente en Cuba, pp. 357-366. La Habana.

González, P., J.R. Fagundo, G. Benítez, S. Jiménez, V. Ferrera, A. González, E. Romero, D. Orihuela, J. Ramírez, M. Suárez (1999). Metodología para la caracterización geoquímica de los acuíferos cársicos costeros. I. Muestreo sistemático y caracterización de facies hidroquímicas. Contribución a la Educación y la Protección Ambiental. Ed. ISCTN, La Habana, Volúmn 0: 173-181, 1999; Vol. 2 (V Taller), pp. 8, 2001. ISBN 959-7136-09-0

Herman, J.S., Back, W. and Pomar, L. (1986). Speleogenesis in groundwater mixing zone. The coastal carbonate aquifers of Mallorca and Menorca, Spain. 9 th Congreso Internacional de Espeleología, Barcelona, 1: 13-15.

Hernández Espinosa, Maydelin (2002). Caracterización hidroquímica de la cuenca hidrogeológica Sur de Pinar del Río. Maestría en Ordenamiento Territorial. Mención Hidrología y Manejo de Cuencas. Facultad de Geografía (UH).

Jacobson, R.L. and Langmuir, D. (1975). An accurate method for calculating saturation level of ground waters with respect to calcite and dolomite. Trans. Cave Res. Group. G. Brit., 14: 104-108.

Jiménez Echevarría, S. (1999). Estudio del efecto modificador del Dique Sur en el acuífero costero de Artemisa-Quivicán. Maestría en Ciencias del Agua. CNIC.

Krawczyk, W. (1992). Methods of field analytics of karst water. In: Hydrochemical methods in dynamic geomorphology. Scientific Works of Silesian University in Katowice, Katowice, (1254): 65-83.

León Avendaño, R. Química General Superior. (1991). La Habana. Ed: Pueblo y Educación.

Leonarte Pérez, Tamara. (2005). Calidad de las aguas subterráneas de los acuíferos de Gerona y Santa Fe. pp. 76. Tesis (Master en Ciencias en Protección y Evaluación de Impacto Ambiental). ISCTN. La Habana.

López Cabrera, C. M. (2002). Componentes del medio ambiente: el agua. En: Introducción al conocimiento del medio ambiente, pp. 6-15. La Habana. Ed. Juventud Rebelde.

Llerena Portilla, Maritza. (2000). Caracterización hidroquímica de las aguas de la Sierra del Rosario y Alturas del Mariel, pp. 73. Tesis (Master en Ciencias en Protección y Evaluación de Impacto Ambiental). ISCTN. La Habana.

Mapinfo Corp. (1996). Mapinfo Profesional (Versión 4.1)

Machkova, M., Tzankov, K., Mandadjiev, D., Velikovand, B. and Dimitrov, D. (1993). Solving an ecological problem related to the surface and groundwater

Markowicz M. and Pulina M. (1979). Semi-quantitative chemical analyses of water in the carboniferous Karst areas. Preace Naukowe Univ. Slaskiego Katowice, pp. 167.

Mazola Collazo, Nelson. (1991). Manual del Sistema Internacional de unidades. La Habana. Ed. Pueblo y Educación, pp. 275.

Monteagudo Zamora, V; J. R. Fagundo; C. I. Saínez; E. Vázquez (2007 a). Origen de la composición química de las aguas naturales de la Cuenca sur de Las Tunas. En: Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA. Las Tunas, Cuba, Tomo: 003. Nro 128, pp. 10. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813 SCPST-0406306.

Monteagudo Zamora, V; J. R. Fagundo; C. I. Saínez; E. Vázquez (2007 b). Origen de la composición química de las aguas naturales de la Cuenca Tunas Norte. En: Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA. Las Tunas, Cuba., Tomo: 003. Nro 129, pp. 10. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813 SCPST-0406306

Monteagudo Zamora, V; J. R. Fagundo; C. I. Saínez; E. Vázquez (2007 c). Origen de la composición química de las aguas naturales del Macizo Hidrogeológico del Cretácico en la provincia de Las Tunas. En: Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del

CITMA. Las Tunas, Cuba, Tomo: 003. Nro 130, pp. 10, ISSN: 1025-6504 RNPS-1813 SCPSCT-0406306

Monteagudo Zamora, V; J. R. Fagundo; C. I. Saínez; E. Vázquez (2007 d). Origen de la composición química de las aguas subterráneas en la provincia de Las Tunas. En: Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA. Las Tunas, Cuba, Tomo: 003. Nro 131, pp. 10. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813 SCPSCT-0406306

Monteagudo Zamora, Vilma, Juan Reynerio Fagundo Castillo, Cristina Isabel Saínez Peña, Mildred Rebeca Branco Gómez (2007 e). Aplicaciones de la cinética química al estudio de los procesos de interacción agua-roca en Las Tunas. Revista Electrónica Innovación Tecnológica, del Centro de información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA en Las Tunas, Tomo 003 Nro 132, pp. 10. ISSN-1025-6504. RNP3-1813. SCPSCT-0406306.

Monteagudo Zamora, V; J. R. Fagundo; C.I. Saínez; E. Vázquez (2007 f). El recurso agua: conservación para el desarrollo social en Las Tunas, Cuba. En: IV Encuentro Internacional Desarrollo Sostenible y Población. Universidad de Málaga. España, pp. 20. ISBN-13:978-84-690-6201-5

Monteagudo Zamora, V. (2008). La educación ambiental para el desarrollo sostenible desde la escuela para proteger y ahorrar agua. V Encuentro Internacional sobre Desarrollo Sostenible y Población. Universidad de Málaga, España, pp. 20. ISBN-13: 978-84-691-1654-8

Moran, J. E. y T. P. Rose. (2003). A chlorine-36 study of regional groundwater flow and vertical transport in southern Nevada. Environmental Geology, 592-605. Springer-Verlag: ISSN: 0943-0105.

Morell, I. A. Pulido Bosch. J. R. Fagundo, F. López-Vera, M. López-Chicano y P. González. (1997). Caracterización de los acuíferos karsticos de la cuenca Zapata, Matanzas. En: I Congreso Ibérico de Geoquímica: pp. 367-374. España. Editor: CEDEX.

NC. 93-02 (1985). Norma Cubana de Agua Potable. Oficina Nacional de Normalización. La Habana, Cuba, pp. 8.

NC. 93-11 (1986). Norma de Fuentes de Abastecimiento. La Habana. Oficina Nacional de Normalización, pp. 6.

NC. 93-01-218 (1995). Norma Cubana de Aguas Minerales. La Habana. Oficina Nacional de Normalización, pp. 8.

N.C 2: (1996). Agua de Bebida Envasada. Especificaciones Oficina Nacional de Normalización (La Habana, Cuba), pp. 5.

Nekrásov. B.V. (1981). Química General. Moscú. Editorial MIR.

Newbrough, P. C. Gammons. (2002). An experimental study of water-rock interaction and acid rock drainage in the Butte mining district, Montana. In: Environmental Geology, 705-709. Springer-Verlag. ISSN: 0943-0105.

Parkhurst D.L., L.N. Plummer y D.C. Thordtenson (1982). BALANCE - A computer program for calculating mass transfer for geochemical reactions in ground water. U.S.G.S. Water Resources Investigations, 29: -14.

Parkhurst, D.L. (1997). PHREEQC. U.S. Geol. Survey, No. FOS 87.

Parkhurst, D.L. and C.A.J. Appelo (1999). User's guide to PHREEQC - A computer program for speciation, reaction path, advective transport, and inverse geochemical calculations. U.S.G.S. Water Resources Investigations Report, 99-4259, 1-312.

Peña Forte, Boris. (2000). Caracterización de Sistemas Hidrotermales del Distrito Físico-Geográfico de Pinar del Río. La Habana, pp. 88. Tesis (Master en Geografía, Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial). Universidad de la Habana.

Pérez Yero, J. C. (2003). Contribución al manejo de los suelos salinos del sector norte de Las Tunas a través de la caracterización de los factores que inciden en estos procesos. Las Tunas, pp. 78. Tesis de Master en Geología Ambiental. IMMM.

Plummer, L.N., E.C. Prestemon y D.L. Parkhurst (1991). An interactive code (NETPATH) for modelling NET geochemical reactions along a flow PATH. U.S.G.S. Water Resources Investigations Report, 91-4078, 1-94.

Ponce, L (1980). Statistical methods commonly used in water quality data analysis. WSDG Technical paper. WSDG-TP-00001. Watershed Development Groups, USDA Forest Service, Colorado, pp. 136.

Ramos Guadalupe, L. E (2003). Elementos de meteorología y climatología. En Tabloide, pp. 4.

Rodríguez Piña, Mónica. (2004). Aplicaciones de la Química Física en la caracterización del sistema de flujos de la Sierra del Rosario, Pinar del Río, Cuba. Tesis de Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo, pp. 86. Centro de Estudios de Medio Ambiente. Universidad de La Habana.

Saínez, C. I; D. Olano; V. Monteagudo Zamora (2004 a). Propuesta teórico-metodológica para el estudio de las aguas subterráneas de la localidad en la enseñanza de la Geografía Escolar. En: Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA. Las Tunas, Cuba, Tomo: 002. Nro 124, pp. 21. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813

Saínez, C. I; D. Olano; V. Monteagudo Zamora (2004 b). Propuesta teórico-metodológica para el estudio de los ríos de la localidad en la enseñanza de la Geografía Escolar. En: Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA. Las Tunas, Cuba, Tomo: 002. Nro 125, pp. 21. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813

Saínez, C. I; D. Olano; V. Monteagudo Zamora (2004 c). Propuesta teórico-metodológica para el estudio de lagos y embalses de la localidad en la enseñanza de la Geografía Escolar. En: Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA. Las Tunas, Cuba, Tomo: 002. Nro 126, pp. 21. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813

Saínez, C. I; D. Olano; V. Monteagudo Zamora (2004 d). Propuesta teórico-metodológica para el estudio de las ciénagas o pantanos de la localidad en la

enseñanza de la Geografía Escolar. En: Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA. Las Tunas, Cuba, Tomo: 002. Nro 127, pp. 21. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813

Sánchez Rodríguez, Luis. (2000). Hidrogeoquímica del Sistema Hidrotermal de San Diego-Bermejales en Pinar del Río. La Habana. pp. 99. Tesis (Opción al título de Master en Ciencias del Agua). CNIC. La Habana.

Shuster E.T. and W. B. White. (1971). Seasonal fluctuation in chemistry of limestone spring: a possible mean for characterising carbonate aquifers. Hydrology: 93-128.

Sjoberg, E.L. and Rickard, D.T. (1984). Temperature dependence of calcite dissolution kinetics between 1 and 62 °C at pH 2,7 to 8,4 in aqueous solution. Geochim. Cosmochim. Acta, 48: 485-493.

Sosa García, Yolanda. (2004). Hidrosfera y su componente principal: el océano mundial. En: Geografía Física General. Temas Seleccionados. La Habana. Ed. Pueblo y Educación: 141-156.

Stiff, H.A. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of pattern, Jour. Petroleum Technology, 3 (10): 15-17.

Stumm W.S. and J.J. Morgan. (1970). Aquatic Chemistry. An Introduction Emphasizing Chemical Equilibrium in natural Water. Nueva York. Ed. Wiley-Interscience, pp. 583.

Suárez, M., P. González, J. R. Fagundo, M. Llerena, C. Melián (2005). Representación de las propiedades de las aguas mineromedicinales de la Sierra del Rosario. Revista CENIC. Ciencias Químicas. V 36, Número Especial, pp.9. ISSN 0258-6002.

Suárez, M., P. González, J. R. Fagundo, G. Benítez, C. Melián, B. Luna, M. Llerena (2006). Métodos de la estadística bivariada para la agrupación hidroquímica de aguas naturales y mineromedicinales de la Sierra del Rosario. En: Contribución al conocimiento geológico, hidrogeológico, ambiental y del termalismo en la Sierra del Rosario. J.R. Fagundo, I. Antigüedad, P. González, C. Melián, M. Suárez (editores).

CD editado por: Productos y Servicios Geográficos (GEOTECH), pp. 10. ISBN 959-7167-10-7.

Suárez Muñoz, Margaret, Patricia González Hernández, Juan Reynerio Fagundo Castillo (2007). Metodología Analítica del Estudio de las Aguas Minerales y Mineromedicinales. En: Aguas Minerales, Naturales, Minero-Medicinales y Peloides de Cuba. Algunas Consideraciones. Editora principal: Maritza E. Llerena Portilla. Instituto de Geografía Tropical, Centro de Medicina Natural y Tradicional, Universidad de Huelva. Productos y Servicios Geográficos (GEOTECH): 83-85. ISBN 978-959-7167-15-0.

Tillán G., I. Vinardell, J.R. Fagundo, V. Ferrera, P. González y L. Sánchez. (1996). SACAN: sistema automatizado para la caracterización de aguas naturales. Contribución a la Hidrogeología y el Medio Ambiente: 113-121. Ed. CNIC. La Habana.

Tóth, J. (1995). Groundwater as a geological agent. An overview of the causes, processes and manifestations, Hydrogeology Journal, España: 1-14.

Tóth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. Boletín Geológico y Minero. España. Instituto Geológico Minero: 9-25. ISSN 0366-0176.

Vázquez Fernández, E, R. Rodríguez. (2000). Estudio de la hidrogeología de la provincia Las Tunas. Las Tunas, pp. 19. INRH.

Vázquez Fernández, E, R. Rodríguez. (2005). Compendio hidrogeológico de la provincia Las Tunas. Las Tunas, pp. 23. INRH.

Vázquez Fernández, E. (2006). Historia de Las Tunas. Hidrogeología regional: análisis de las aguas subterráneas. Las Tunas, pp. 14. INRH.

Vinardell, I., E. Álvarez, M. Iturralde-Vinent, J. R. Fagundo. (1991). Aplicación del sistema de programas GEOQUIM a la obtención de criterios para la prospección geoquímica. Revista CENIC Ciencias Químicas. La Habana: 66-68.

Wen, X; Y. Zhang. (2004). Analysis of the exchange of groundwater and river water by using Radon-222 in the middle Heihe Basin of northwestern China. *Environmental Geology*, 647-653. Sprinteger-Verlag: ISSN: 0943-0105.

Wu, Y. (2003). Mechanism analysis of hazards by the interaction between groundwater and geo-environmental. *Environmental Geology*, 44-81. Ed. Sprinteger-Verlag: ISSN: 0943-0105.

### **PUBLICACIONES DE LA AUTORA RELACIONADAS CON LA TESIS**

Saínez, C. I; D. Olano; **V. Monteagudo Zamora** (2004). Propuesta teórico-metodológica para el estudio de las aguas subterráneas de la localidad en la enseñanza de la Geografía Escolar. En: *Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA*. Las Tunas, Cuba. Tomo: 002. Nro 124, pp. 21. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813

Saínez, C. I; D. Olano; **V. Monteagudo Zamora** (2004). Propuesta teórico-metodológica para el estudio de los ríos de la localidad en la enseñanza de la Geografía Escolar. En: *Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA*. Las Tunas, Cuba, Tomo: 002. Nro 125., pp. 21. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813

Saínez, C. I; D. Olano; **V. Monteagudo Zamora** (2004). Propuesta teórico-metodológica para el estudio de lagos y embalses de la localidad en la enseñanza de la Geografía Escolar. En: *Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA*. Las Tunas, Cuba, Tomo: 002. Nro 126, .pp. 21. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813

Saínez, C. I; D. Olano; **V. Monteagudo Zamora** (2004). Propuesta teórico-metodológica para el estudio de las ciénagas o pantanos de la localidad en la enseñanza de la Geografía Escolar. En: *Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA*. Las Tunas, Cuba, Tomo: 002. Nro 127, pp. 21. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813

Fagundo, J. R; **V. Monteagudo Zamora**; T. Leonarte; O. Beato; A. Abrahan (2007). Patrones hidrogeoquímicos y origen de la composición química de las aguas

subterráneas que drenan carbonatos. En: VIII Congreso Internacional de Ingeniería Hidráulica. Isla de la Juventud, Cuba, pp. 22. ISBN: 978 959 247 036-1

Fagundo, J. R; **V. Monteagudo Zamora**; M. Rodríguez; T. Leonarte; P. González; M. Suárez; C. Melián; A. Abrahán (2007). Geoquímica de las aguas subterráneas que drenan carbonatos del intervalo jurásico-Paleógeno. En: Geociencias 2007. La Habana, Cuba. pp 20. ISBN: 978-959-7117-16-2

**Monteagudo Zamora, V**; J. R. Fagundo; C. I. Saínez; E. Vázquez (2007). Origen de la composición química de las aguas naturales de la Cuenca sur de Las Tunas. En: Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA. Las Tunas, Cuba, Tomo: 003. Nro 128, pp. 10. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813 SCPSCT-0406306

**Monteagudo Zamora, V**; J. R. Fagundo; C. I. Saínez; E. Vázquez (2007). Origen de la composición química de las aguas naturales de la Cuenca Tunas Norte. En: Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA. Las Tunas, Cuba, Tomo: 003. Nro 129, pp 10. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813. SCPSCT-0406306

**Monteagudo Zamora, V**; J. R. Fagundo; C. I. Saínez; E. Vázquez (2007). Origen de la composición química de las aguas naturales del Macizo Hidrogeológico del Cretácico en la provincia de Las Tunas. En: Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA. Las Tunas, Cuba, Tomo: 003. Nro 130, pp. 10. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813. SCPSCT-0406306.

**Monteagudo Zamora, V**; J. R. Fagundo; C. I. Saínez; E. Vázquez (2007). Origen de la composición química de las aguas subterráneas en la provincia de Las Tunas. En: Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA. Las Tunas, Cuba, Tomo: 003. Nro 131, pp 10. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813. SCPSCT-0406306.

**Monteagudo Zamora, V**; J. R. Fagundo; C. I. Saínez; E. Vázquez (2007). Aplicaciones de la Cinética Química al estudio de los procesos de interacción agua-

roca en Las Tunas. En: Revista Electrónica Innovación Tecnológica del Centro de Información y Gestión Tecnológica y Ambiental del CITMA. Las Tunas, Cuba, Tomo: 003. Nro 132, pp. 10. ISSN: 1025-6504 RNPS-1813. SCPST-0406306.

**Monteagudo Zamora, V;** J. R. Fagundo; C. I. Saínz; E. Vázquez (2007). El recurso agua: conservación para el desarrollo social en Las Tunas, Cuba. En: IV Encuentro Internacional Desarrollo Sostenible y Población. Universidad de Málaga. España, pp. Pp. 20. ISBN-13:978-84-690-6201-5

**Monteagudo Zamora, V.** La educación ambiental para el desarrollo sostenible desde la escuela para proteger y ahorrar agua. V Encuentro Internacional sobre Desarrollo Sostenible y Población. Universidad de Málaga, España, pp. 20. ISBN-13: 978-84-691-1654-8

#### **TRABAJOS PRESENTADOS EN EVENTOS CIENTÍFICOS RELACIONADOS CON LA TESIS**

**Monteagudo Zamora, V.** La educación ambiental comunitaria en la protección de las aguas. I Taller Científico Internacional ECOMUJER. Pinar del Río, Cuba. Marzo 4 al 7, 1996.

**Monteagudo Zamora, V.** La escuela media y la educación popular ambiental en la protección de las aguas. Evento Científico Internacional ECOMUJER. Pinar del Río, Cuba. Marzo 4 al 7, 1998.

**Monteagudo Zamora, V.** Estudio del impacto ambiental del CAI Perú en las aguas naturales del sur de la provincia de Las Tunas. III Taller Internacional ECOMUJER. Pinar del Río, Cuba. Marzo 8 al 10, 2000.

**Monteagudo Zamora, V.** Evaluación del tratamiento de las aguas residuales del CAI Perú de la provincia de Las Tunas. III Taller Internacional ECOMUJER. Pinar del Río, Cuba. Marzo 8 al 10, 2000.

**Monteagudo Zamora, V.** Estudio del impacto ambiental del CAI Perú en las aguas naturales del sur de la provincia de Las Tunas. XIII Forum de Ciencia y Técnica. Las Tunas, Cuba. 30 de septiembre de 2000.

**Monteagudo Zamora, V.** La educación ambiental comunitaria en la protección del recurso natural agua. Evento Provincial Pedagogía 2001. Las Tunas, Cuba. 7 de Abril, 2001.

**Monteagudo Zamora, V.** Estudio integral del agua desde las ciencias naturales. II Congreso Internacional de Didáctica de las Ciencias. Las Tunas, Cuba. 10 de noviembre de 2001.

**Monteagudo Zamora, V.** Proyecto Educación-Medio Ambiente-Territorio: materiales de apoyo para la secundaria básica. II Congreso Internacional de Didáctica de las Ciencias. Las Tunas, Cuba. 10 de noviembre de 2001.

**Monteagudo Zamora, V.** Potencialidades de los estudiantes universitarios para la realización de investigaciones ambientales dirigidas a la protección de las aguas. II Congreso Internacional de Didáctica de las Ciencias. Las Tunas, Cuba. 10 de noviembre de 2001.

**Monteagudo Zamora, V.** Materiales didácticos para el estudio del componente agua. II Taller Provincial sobre Ciencia, Medio Ambiente, Ética y Sociedad. Las Tunas, Cuba. 16 de noviembre de 2001.

**Monteagudo Zamora, V.** Estudio integral del agua desde las ciencias naturales. Evento provincial de Pedagogía 2003. Las Tunas, Cuba. 2 de octubre de 2002.

**Monteagudo Zamora, V.** La gestión universitaria por la conservación de las aguas naturales. V Conferencia Internacional UNICA 2002. Taller Pedagogía y Gestión Universitaria. Ciego de Ávila, Cuba. 22 al 26 de octubre de 2002.

**Monteagudo Zamora, V;** A. Pérez. Una experiencia sobre la introducción de la dimensión ambiental en el currículo de la enseñanza técnica industrial para la conservación de las aguas. III Encuentro Internacional Europa-América Latina sobre formación tecnológica y profesional. La Habana, Cuba. 3 al 9 de noviembre de 2002.

**Monteagudo Zamora, V.** Potencialidades de los estudiantes universitarios para la realización de investigaciones ambientales dirigidas a la protección de las aguas. IV Taller Internacional ECOMUJER. Pinar del Río, Cuba. 5 al 7 de Marzo de 2002.

**Monteagudo Zamora, V.** Caracterización de las aguas subterráneas en el sector Norte de Las Tunas. Evento Provincial de Geociencias. Las Tunas, Cuba. 9 de febrero de 2003.

**Monteagudo Zamora, V.** Metodología para la caracterización químico-física de las aguas naturales de la provincia de Las Tunas. I Taller de Introducción y Generalización de Resultados de Investigación. Las Tunas, Cuba. 30 de abril de 2003.

**Monteagudo Zamora, V.** Materiales didácticos para el análisis químico físico de las aguas subterráneas y su estudio desde las ciencias naturales. Evento provincial de Pedagogía 2004. Las Tunas, Cuba. 13 de octubre de 2003.

**Monteagudo Zamora, V.** Caracterización químico-física de las aguas naturales de la provincia de Las Tunas. XV Forum de Ciencia y Técnica. Las Tunas, Cuba. 8 de julio de 2004.

**Monteagudo Zamora, V.** Estudio integral del agua desde una concepción multidisciplinar. Evento provincial de Pedagogía 2005. Las Tunas, Cuba. 12 de octubre de 2004.

**Monteagudo Zamora, V;** C. I. Saínez; S. Monteagudo; O. Mantecón. Educación, Medio Ambiente, Territorio: Materiales de apoyo para el estudio del agua en la enseñanza media. V Taller Internacional ECOMUJER. Pinar del Río, Cuba. 8 al 11 de Marzo de 2004.

**Monteagudo Zamora, V;** C. I. Saínez; S. Monteagudo; O. Mantecón. Caracterización hidroquímica de acuíferos y otros cuerpos de agua al sur de la provincia de Las Tunas. V Taller Internacional ECOMUJER. Pinar del Río, Cuba. 8 al 11 de Marzo de 2004.

Gámez Bernal S. I; J. C. Pérez; **V. Monteagudo Zamora.** Contribución al manejo de los suelos salinos del sector norte de la provincia de Las Tunas, a través de la caracterización de los factores que inciden en estos procesos. V Taller Internacional ECOMUJER. Pinar del Río, Cuba. 8 al 11 de Marzo de 2004.

**Monteagudo Zamora, V.** Educación, medio ambiente, territorio: materiales de apoyo para la enseñanza media básica en Las Tunas. Evento Internacional de Pedagogía 2005. La Habana, Cuba. 31 de enero al 4 de febrero de 2005.

Días Castillo, R; **V. Monteagudo Zamora**; M. Rodríguez; C. I. Saínez; J. C. Pérez; S. Prado; E. Zaldívar; A. Parra; N. Báez; J. López; A. Almaguer; O. Palomares. Material de apoyo en multimedia para la educación ambiental en la enseñanza media básica de la provincia de Las Tunas. V Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo. V Congreso de Educación ambiental para el Desarrollo Sostenible. La Habana, Cuba. 4 al 8 de julio de 2005.

Días Castillo, R; **V. Monteagudo Zamora**; M. Rodríguez; C. I. Saínez; J. López; J. C. Pérez; E. Zaldívar; M. Fernández; M. Rodríguez; S. Prado; M. Parra; D. Olano; I. Gámez. Escuela, medio ambiente, territorio: materiales de apoyo para la enseñanza media básica. IX Encuentro Johannes Bisse in Memoriam. Camaguey, Cuba. 2005.

**Monteagudo Zamora, V.** Papel de la universidad en la dirección de investigaciones ambientales para la protección de las aguas. Evento provincial UNIVERSIDAD 2006. Las Tunas, Cuba. 16 de mayo de 2006.

**Monteagudo Zamora, V.** Estudio de los procesos geoquímicos que inciden en la calidad del agua en la provincia de Las Tunas. VI Taller Internacional ECOMUJER. Pinar del Río, Cuba. 6 al 8 de Marzo de 2006.

**Monteagudo Zamora, V.** Origen de la composición química de las aguas naturales en la cuenca La Cana de la provincia de Las Tunas. VI Taller Internacional ECOMUJER. Pinar del Río, Cuba. 6 al 8 de Marzo de 2006.

**Monteagudo Zamora, V.** Caracterización químico física de las aguas subterráneas de la provincia de Las Tunas. Taller Internacional de la OXFAM. Las Tunas, Cuba. 16 de marzo de 2007.

**Monteagudo Zamora, V.** Enfoque multidisciplinar en el estudio de las aguas. Evento provincial UNIVERSIDAD 2008. Las Tunas, Cuba. 16 de Mayo de 2007.

**Monteagudo Zamora, V.** Metodología para la caracterización de las aguas naturales. XVIII Forum de Ciencia y Técnica. Las Tunas, Cuba. 16 de mayo de 2007.

**Monteagudo Zamora, V.** Estudio de los procesos geoquímicos que inciden en la calidad del agua en la provincia de Las Tunas. III Taller Internacional sobre Ciencia, Medio Ambiente, Ética y Sociedad. La Habana, Cuba. 27 al 30 de marzo de 2007.

**Monteagudo Zamora, V.** El recurso agua: conservación para el desarrollo social en Las Tunas. IV Encuentro Internacional sobre Desarrollo Sostenible y Población. Universidad de Málaga, España, del 5 al 22 de junio de 2007.

**Monteagudo Zamora, V.** La educación ambiental para el desarrollo sostenible desde la escuela para proteger y ahorrar agua. V Encuentro Internacional sobre Desarrollo Sostenible y Población. Universidad de Málaga, España, del 6 al 23 de junio de 2008.

## **PREMIOS Y RECONOCIMIENTOS RECIBIDOS EN EL MARCO DE ESTA TESIS.**

1. Educador ejemplar. (1986-2007)
2. Distinción por la Educación Cubana. (1995)
3. Destacado municipal en el trabajo de la ANIR. (1998)
4. Medalla Pepito Tey. (1998)
5. Premio del Rector. (1998)
6. Premio Especial del Ministro de Educación. (1998)
7. Premio del Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. (1998)
8. Vanguardía Nacional del Sindicato de las Ciencias. (1998)
9. Cuadro destacado. (1998)
10. Destacado en la actividad científica. (1999)
11. Relevante en el XIII Forum de Ciencia y Técnica municipal. (2000)
12. Destacado provincial en el XIII Forum de Ciencia y Técnica. (2000)
13. Vanguardía Nacional de la ANIR. (2000; 2001; 2002)
14. Destacado en la actividad científica. (2001)
15. Reconocimiento al mejor resultado en proyectos de investigación de las Ciencias Pedagógicas. (2001)
16. Reconocimiento de la Sociedad de Geociencias y Química. (2001)
17. Reconocimiento por los resultados alcanzados en el evento de Mujeres Creadoras. (2001)
18. Destacado provincial del SNTECD. (2003)
19. Mejor trabajador del instituto. (2003)
20. Destacado en la actividad científica. (2002)
21. Distinción Rafael María de Mendive. (2004)
22. Sello por el XXX Aniversario de la Educación Superior. (2006)

# **ANEXOS**

**Tabla 1.2. Potencial hídrico subterráneo de las cuencas y tramos Hidrogeológicos. (Anexo I).**

<b>Cuencas</b>	<b>Área/Km<sup>2</sup></b>	<b>Formación Geológica</b>	<b>Volumen de agua/m<sup>3</sup></b>	<b>Usos del agua</b>
Sevilla	774,25	Güines y Arroyo Palma	361,60.10 <sup>6</sup>	Abasto a la población y riego a la caña
Colombia	164,00	Arroyo Palma	17,00.10 <sup>6</sup>	Riego de cultivos varios y caña
Birama	300,00	Arroyo Palma y Yayal	22,00.10 <sup>6</sup>	Abasto a la población y riego a la caña
Ojo de Agua	4,10	Yayal	0,32.10 <sup>6</sup>	Abasto a la población
Omaja	6,00	Yayal	0,30. 10 <sup>6</sup>	Abasto a la población y ganadería
Lora	40,00	Vázquez	-----	Abasto al turismo
Chaparra	20,30	Vázquez	8,29. 10 <sup>6</sup>	Abasto a la población, turismo e industria
Puerto Padre	25,23	Vázquez y Puerto Padre	4,465. 10 <sup>6</sup>	Abasto a la población y turismo
Yarey-Maniabón	47,60	Vázquez y Macizo del Cretácico	11,28. 10 <sup>6</sup>	Abasto a la población y cultivos varios
La Cana	77,92	Vázquez	26,87. 10 <sup>6</sup>	Abasto a la población
Las Margaritas	12,00	Vázquez	0,70. 10 <sup>6</sup>	Abasto a la población

**Tabla 2.2. Determinaciones y métodos de análisis químicos empleados en el laboratorio. (Anexo II)**

Nº	Determinaciones	Método Utilizado
1	$\text{NO}_3^-$	Colorimétrico Brucina
2	$\text{NO}_2^-$	Colorimétrico ( $\alpha$ -naftilamina)
3	$\text{CO}_3^{2-}$	Volumétrico
4	$\text{HCO}_3^-$	Volumétrico
5	$\text{Cl}^-$	Volumétrico (Morh)
6	$\text{Ca}^{2+}$	Volumétrico (EDTA)
7	$\text{SO}_4^{2-}$	Turbidimétrico
8	$\text{Mg}^{2+}$	Volumétrico (EDTA)
9	pH	Potenciométrico
10	Turbiedad	Colorimétrico
11	Conductividad Eléctrica	Colorimétrico
12	Coniformes Fecales	Tubos Múltiples
13	Coniformes Totales	Tubos Múltiples
14	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	Por diferencia

**Tabla 2.3 a. Inventario de puntos de agua. Cuenca Tunas Norte (Anexo III a).**

No	FORMACIÓN	SITIO	MUESTRA	N	X	Y
1	Vázquez	Pto Padre	P-12	30	275300	509800
2			P-87	101	265000	507000
3			P-104	143	263900	508550
6		Menéndez	P-175	68	276100	537300
7		Menéndez	El Cocal II	25	278560	536310
9		Manatí	P-19	48	286500	481150
10	Pto. Padre	Pto Padre	Siete Aulas	13	281522	523476
11			Reparto Militar	9	281600	524700
5			P-53	52	282660	523650
8	Caobilla	Manatí	Acto Manatí	24	291500	489950
4		Pto Padre	P-105	34	280900	523750

**Tabla 2.3 b. Inventario de puntos de agua. Cuenca Sur de Las Tunas (Anexo III b).**

NO	FORMACIÓN	SITIO	MUESTRA	N	X	Y
12	Güines	Amancio	Las Maboas	22	232600	421900
13			P-292	12	239100	413800
14	Arroyo Palma	Amancio	Carret. Amancio	47	237650	450700

**Tabla 2.3 c. Inventario de puntos de agua. Macizo Hidrogeológico del Cretácico (Anexo III c).**

Nº	FORMACIÓN	SITIO	MUESTRA	N	X	Y
16	Jimaguayú	Colombia	P-195	16	250400	444750
17	Yáquimo	Amancio	P-45	12	254300	416150
18	Caobilla	Manatí	P-32	14	290250	491950
20	Contramaestre	Majibacoa	Presa Rincón	84	247520	494100
21		Las Tunas	Presa Cayojo I	147	254520	474200
22			Presa Cayojo II	63	255120	475200
23		Jobabo	Central Jobabo	23	249400	452200
24			Quinta Planta	17	246000	454500
19			P-248	60	241820	463980
25	Guáimaro	Colombia	Edificio Parque	10	257250	439500
26			La Siberia	12	259250	439500
27			Alba Flores	25	259200	437300
28			Circunscripción 7	11	257250	439500
29			Cabec Colombia	13	257250	439500
30			MINAZ Colombia	13	257250	439500
31	Iberia	Pto Padre	P-180	12	275650	523850

**Tabla 2.4. SST medio, intervalo de TSS, Cl- medio e intervalo de Cl- correspondiente a cada grupo de agua. Provincia de Las Tunas. (Anexo III d)**

No	Muestra	Grupo	X	Y	SST medio (mg/L)	Intervalo SST	Cl <sup>-</sup> medio (mg/L)	Intervalo Cl <sup>-</sup>
1	P-12	1	509800	275300	701	2	101	2
2	P-87	1	506440	264660	675	2	77	1
3	P-104	1	508730	263980	626	2	59	1
4	P-105	1	506980	265010	728	2	111	2
12	Las Maboas	1	420950	232910	1411	3	171	2
13	P-292	1	413970	239040	1258	3	127	2
14	Carret. Amancio	1	422850	243410	1657	4	208	3
15	P-139	1	437340	246020	800	2	102	2
16	P-195	1	444750	250400	533	1	31	1
19	P-248	1	463990	241850	1281	3	180	2
23	Central Jobabo	1	451800	249700	1438	3	335	4
24	Quinta Planta	1	453200	250700	1481	3	329	4
25	Edif. Parque	1	439760	258760	1030	3	127	2
26	La Siberia	1	440490	259000	1354	3	210	3
9	P-19	2	480270	286450	831	2	127	2
20	Psa Rincón	2	246180	494110	441	1	85	1
21	Psa Cayojo 1	2	253600	474600	385	1	80	1
22	Psa Cayojo 2	2	253623	474618	445	1	88	1
28	Circunscripción 7	2	437800	259650	1968	4	201	3
29	Cab. Colombia	2	437240	259260	1391	3	141	2
5	P-53	3	527300	280700	1184	3	170	2
7	El Cocal II	3	537800	278400	1902	4	421	4
6	P-175	3	537300	277500	1514	3	193	2
8	Acto Manatí	3	492350	291880	2768	4	480	4
10	Siete Aulas	3	524000	281600	2009	4	239	3
11	Reparto Militar	3	525100	281300	2211	4	405	4
18	P-32	3	491950	290250	2336	4	558	4
27	Alba Flores	3	437700	260860	977	2	104	2
31	P-180	3	523850	275850	1338	3	125	2
17	P-45	4	416900	254380	542	1	133	2
30	MINAZ	4	438030	259490	1030	3	141	2
	TSS	Intervalo				Cl <sup>-</sup>	Intervalo	
	400-599	1				0-99	1	
	600-999	2				100-199	2	
	1000-1899	3				200-299	3	
	1900-3000	4				300-500	4	

**Tabla 3.8 a. Experimentos de laboratorio de lavado de suelos con agua destilada en áreas afectadas por el fenómeno de salinización en Las Tunas. (J. C. Céspedes, 2000). (Anexo IV)**

Horizonte	Prof. (cm)	SST (ppm)	Cationes -meq/ 100g						Aniones-meq/100g			Suma
			Ca	Mg	K	Na	Suma	CO3	SO4	Cl	HCO3	
Municipio Manatí												
A	0 - 24	700	0.33	0.28	0.02	0.29	0.92					
B	20 - 50	1 600	1.03	0.43	0.01	0.78	2.25	0	0.45	1.47	0.42	2.34
C	50 - 85	3 700	1.37	0.76	0.01	3.11	5.25	0	1.35	3.23	0.42	5.00
Municipio Puerto Padre												
A	0 - 25	17 741	6.12	5.89	0.23	16.2	28.48	0.1	5.33	25.4	0.65	31.43
B	25 - 55	26 266	13.8	10	6.28	23.7	53.79	0	19.6	28.8	0.4	48.75
C	55 - 87	25 344	11.4	9.22	0.32	25	45.93	0	17.32	28.2	0.35	45.87
Municipio Jesús Menéndez												
A	0 - 30											
B	30 - 60	0.2	0.52	0.23	0.03	2.2	2.98	0	0.13	1.18	1.4	2.71
C1	60 - 90	0.26	0.43	0.3	0.03	2.8	3.56	0	0.77	1.8	1.1	3.67
C2	90-120	0.23	0.18	0.15	0.03	2.6	2.96	0	0.26	1.55	1.03	2.84
A	0 -20	0.75	6.15	3.52	0.03	0.36	10.06					
B	20 - 45	0.5	4.69	1.79	0.02	0.3	6.8					
Municipio Las Tunas												
A	0 - 27	800	0.64	0.35	0.05	0.11	1.15					
B	27 - 55	400	0.31	0.13	0.02	0.08	0.54					
Municipio Amancio												
A	0-25											
B1	25-58											
B2	58-95	4 900	1.6	0.41	0.08	4.66	6.75	0	0.74	4.06	0.08	4.88
B3	95-120	1 500	0.47	0.3	0.02	1.13	1.92	0	0.34	1.62	0.08	2.04
A	0 - 28											
B1	28 -55											
B2	55 -85	3 000	0.83	0.25	0.04	2.91	4.03	0	0.49	3.28	0.08	3.85
B3	85 -115	4 600	1.04	0.45	0.08	4.5	6.07	0	0.78	4.9	0.08	5.76
Municipio Colombia												
A												
B1	30 -60	1 100	0.08	0.12	0.03	1.43	1.66					
B2	60 -90	1 500	0.13	0.13	0.03	1.87	2.16	0	0.46	0.78	0.99	2.23
B3	90 -120	1 600	0.13	0.17	0.02	2.46	2.78	0	0.69	1.08	0.88	2.65
Municipio Jobabo												
A	0-20	700										
B1	20-59	1 400	0.23	0.07	0.01	1.60		0	0.25	1.13	0.42	
B2	59-80	3 000	0.08	0.18	0	3.78		0.10	1.50	1.57	0.75	
C	80-114	3 000	0.08	0.14	0	3.78		0	2.00	1.47	0.45	
Municipio Majibacoa												
A	0 -25	430	0.04	0.11	0.05	0.3	0.5	0.15	0.1	0.1	0.25	0.60
B	25 - 55	420	0.04	0.11	0.05	0.33	0.53	0.15	0.12	0.2	0.25	0.72
C1	55 - 85	920	0.04	0.11	0.05	0.77	0.97	0.12	0.16	0.5	0.3	1.08
C1	85 - 115	540	0.04	0.07	0.05	0.43	0.59	0.2	0.12	0.4	0.1	0.82
C1	115 - 140	480	0.04	0.07	0.05	0.35	0.51	0.1	0.12	0.3	0.1	0.62
C1	140 - 175	360	0.04	0.07	0.05	1.29	1.45	0.1	0.16	0.1	0.1	0.46

**Tabla 3.8 b. Tipos de acumulación iónica en el suelo. Sector Norte de la Provincia de Las Tunas. (Anexo V)**

Horizontes	Profundidad (cm)	Relaciones catiónicas			Relaciones aniónicas		Tipo de Acumulación
		Na+K/Ca+Mg	Mg/Ca	Tipo acumulación	Cl/SO4	HCO3/SO4+Cl	
Municipio Manatí		Municipio Amancio					
A	0 - 24	0.51	0.85	Cálcico Magnésica			
B	20 - 50	0.54	0.42	Cálcico Magnésica	3.27	0.22	Clórica
C	50 - 85	1.46	0.55	Cálcico Magnésica	2.39	0.09	Clórica
Municipio Puerto Padre		Municipio Puerto Padre					
A	0 - 25	1	0.96	Cálcico Sódica	4	0	Clórica
B	25 - 55	1	0.73	Cálcico Sódica	1	0	Sulfática Clórica
C	55 - 87	1	0.81	Cálcico Sódica	2	0.008	Sulfática Clórica
Municipio Menéndez		Municipio Menéndez					
A	0 - 30						
B	30 - 60	2,973	0.44	Sódica	9.077	1,069	Clórica
C1	60 - 90	3,877	0.698	Sódica	2.338	0.428	Clórica
C2	90-120	7.97	0.833	Sódica	5.962	0.569	Clórica
A	0 - 20	0.04	0.57	Cálcico Magnésica			
B	20 - 45	0.05	0.38	Cálcico Magnésica			
C	45 - 85						
Municipio Las Tunas		Municipio Las Tunas					
A	0 - 27	0.16	0.55	Cálcica Magnésica			
B	27 - 55	0.23	0.42	Cálcico Magnésica			
C	50 - 100						

**Tabla 3.8 c. Tipos de acumulación iónica en el suelo. Sector Sur de la Provincia de Las Tunas. (Anexo VI)**

Horizontes	Profundidad (cm)	Relaciones catiónicas		Tipo de Acumulación	Relaciones aniónicas		Tipo de Acumulación
		Na+K/Ca+Mg	Mg/Ca		Cl/SO4	HCO3 /SO4+Cl	
Municipio Amancio		Municipio Amancio					
A	0-25						
B1	25-58						
B2	58-95	2.35	0.25	Sódica	5.48	0.01	Clórica
B3	95-120	1.49	0.63	Cálcico - Sódica	4.76	0.04	Clórica
Municipio Colombia		Municipio Colombia					
A	0 - 28						
B1	28 -55						
B2	55 -85	2.73	0.3	Sódica	6.69	0.02	Clórica
B3	85 -115	3.07	0.43	Sódica	6.28	0.01	Clórica
Municipio Colombia		Municipio Colombia					
A							
B1	30 -60	7.3	1.5	Sódica			
B2	60 -90	7.31	1	Sódica	1.7	0.8	Clórica- Sulfática
B3	90 -120	8.27	1.31	Sódica	1.57	0.5	Clórica- Sulfática
Municipio Jobabo		Municipio Jobabo					
A	0-20				0	0	
B1	20-59	5.37	0.30	Sódica	4.52	0.30	Clórica
B2	59-80	14.54	2.25	Sódica	1.05	0.24	Clórica Sulfática
C	80-114	17.18	1.75	Sódica	0.74	0.13	Sulfática Clórica
Municipio Majibacoa		Municipio Majibacoa					
A	0 -25	2.33	2.75	Sódica	1	1.25	Sulfática Clórica
B	25 - 55	2.6	2.75	Sódica	1.66	1.78	Sulfática Clórica
C1	55 - 85	5.46	2.75	Sódica	3.12	1.43	Clórica
C1	85 - 115	4.36	1.75	Sódica	3.33	0.62	Clórica
C1	115 - 140	3.54	1.75	Sódica	2.5	0.67	Clórica
C1	140 - 175	12.18	1.75	Sódica	0.62	0.59	Clórica

**Tabla 3.9 a. Precipitaciones mensuales en la provincia de Las Tunas entre los años 1995 y 2004. (Anexo VII)**

4.15 a Precipitaciones Puerto Padre														
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	MEDIA
1995	2.7	5.0	6.3	1.6	67.5	157.1	230.9	57.7	36.2	53.6	10.5	5.2	634.3	52.9
1996	64.0	11.1	16.9	62.6	138.7	273.2	78.1	104.5	211.2	84.6	107.6	1.2	1153.7	96.1
1997	52.5	0.4	92.7	1.9	30.3	187.4	130.3	211.5	123.1	185.3	31.0	18	1064.4	88.7
1998	44.9	47.5	116.5	21.4	92.2	162.4	123.0	400.0	310.2	104.4	40.0	4.2	1466.7	122.2
1999	43.9	102.2	18.6	68.1	150.5	169.7	60.7	90.0	87.2	127.1	120.8	0.5	1039.3	86.6
2000	30.1	81.0	13.5	111.6	74.9	170.9	127.0	195.5	116.5	48.5	15.5	195.6	1180.6	98.4
2001	54.1	17.9	35.8	64.6	137.3	117.4	172.3	153.8	131.0	239.7	36.4	30.4	1190.7	99.2
2002	10.5	20.1	25.9	0.0	165.6	179.5	104.9	139.2	95.8	142.7	58.3	10.1	952.6	79.4
2003	84.7	33.5	63.4	75.4	52.7	200.5	79.5	271.0	141.3	108.3	13.6	63.7	1187.6	99.0
2004	2.7	5.0	6.3	1.6	67.5	157.1	230.9	57.7	36.2	53.6	10.5	5.2	634.3	52.9
95-04	<b>39.0</b>	<b>32.4</b>	<b>39.6</b>	<b>40.9</b>	<b>97.7</b>	<b>177.5</b>	<b>133.8</b>	<b>168.1</b>	<b>128.9</b>	<b>114.8</b>	<b>44.4</b>	<b>33.4</b>	<b>1050.4</b>	<b>87.5</b>
1995-2004	Seco		229.7				Húmedo	820.7						

4.15 b Precipitaciones Las Tunas														
Año	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	MEDIA
1995	37.0	8.6	25.6	38.2	98.8	198.0	97.3	357.0	342.2	84.5	44.3	64.4	1395.9	116.3
1996	64.0	11.1	16.9	62.6	138.7	273.2	78.1	104.5	211.2	84.6	107.6	1.2	1153.7	96.1
1997	52.5	0.4	92.7	1.9	30.3	187.4	130.3	211.5	123.1	185.3	31.0	18	1064.4	88.7
1998	44.9	47.5	116.5	21.4	92.2	162.4	123.0	400.0	310.2	104.4	40.0	4.2	1466.7	122.2
1999	43.9	102.2	18.6	68.1	150.5	169.7	60.7	90.0	87.2	127.1	120.8	0.5	1039.3	86.6
2000	30.1	81.0	13.5	111.6	74.9	170.9	127.0	195.5	116.5	48.5	15.5	195.6	1180.6	98.4
2001	54.1	17.9	35.8	64.6	137.3	117.4	172.3	153.8	131.0	239.7	36.4	30.4	1190.7	99.2
2002	10.5	20.1	25.9	0.0	165.6	179.5	104.9	139.2	95.8	142.7	58.3	10.1	952.6	79.4
2003	84.7	33.5	63.4	75.4	52.7	200.5	79.5	271.0	141.3	108.3	13.6	63.7	1187.6	99.0
2004	2.7	5.0	6.3	1.6	67.5	157.1	230.9	57.7	36.2	53.6	10.5	5.2	634.3	52.9
95-04	<b>42.4</b>	<b>32.73</b>	<b>41.52</b>	<b>44.54</b>	<b>100.9</b>	<b>181.6</b>	<b>120.4</b>	<b>198.0</b>	<b>159.5</b>	<b>117.9</b>	<b>47.8</b>	<b>39.3</b>	<b>1126.6</b>	<b>93.9</b>
1995-2004	Seco		248.9				Húmedo	878.2						

**Tabla 3.9 b. Variación de la composición química en períodos seco y húmedo. Las Tunas. (Anexo VIII)**

No	Sector hidrog	Muestra	Periodo	N	CO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	CaCO <sub>3</sub>	TSS
5	Tunas Norte	P-12	Seco	20	30.21	6.30	2.94	0.41	4.17	2.57	2.91	337	689±56
			Húmedo	10	12.30	6.19	2.65	0.52	4.21	2.71	2.44	346	669± 68
4		P-87	Seco	50	22.05	6.13	2.31	0.80	4.15	2.29	2.81	322	670±209
			Húmedo	51	26.46	6.29	2.04	0.73	4.18	2.08	2.80	313	664±93
6		P-104	Seco	67	19.11	6.29	1.70	0.55	4.35	1.88	2.31	312	633±145
			Húmedo	76	18.58	5.95	1.65	0.58	3.91	1.89	2.38	290	605±133
7		P-105	Seco	16	33.93	6.08	3.27	1.13	4.78	2.21	3.48	350	743±117
			Húmedo	18	26.99	5.69	3.01	0.91	4.58	2.00	3.03	329	683±125
11		P-53	Seco	25	24.92	9.78	4.82	1.31	2.29	4.89	8.72	359	1135±296
			Húmedo	27	14.69	10.02	4.74	1.12	2.76	5.12	8.00	394	1134±357
12		P-175	Seco	35	15.07	14.45	5.49	2.47	1.22	3.76	17.42	249	1665±105
			Húmedo	33	13.31	14.35	5.42	2.15	1.12	3.40	17.41	226	1635±138
13		El Cocal	Seco	17	44.70	14.94	11.90	1.92	3.51	7.50	17.74	572	1994±84
			Húmedo	8	25.41	15.09	7.18	1.91	2.65	5.18	16.35	391	1758±160
1		Acto de Manatí	Seco	8	11.00	23.37	13.8	3.34	1.83	4.10	34.55	294	2955±189
			Húmedo	16	8.21	24.07	13.4	2.85	1.53	3.25	35.55	240	2968±192
2	P-19	Seco	23	17.77	6.35	3.70	1.56	2.82	1.69	7.10	226	834±224	
		Húmedo	25	15.62	6.27	3.47	1.43	2.89	1.63	6.65	226	805±207	
9	Siete Aulas	Seco	6	52.58	19.13	7.32	1.33	3.39	5.62	18.76	451	2057±210	
		Húmedo	7	34.07	18.53	6.24	1.63	3.24	5.61	17.56	443	1967±111	
10	Reparto. Militar	Seco	4	16.66	17.23	11.59	2.65	3.44	6.27	21.75	486	2234±76	
		Húmedo	4	31.95	17.22	11.85	2.58	3.69	6.77	21.20	523	2237±71	
30	Sur de las Tunas	Las Maboas	Seco	10	61.97	11.85	4.76	1.15	6.82	5.28	5.66	605	1277±162
			Húmedo	12	62.02	12.51	4.90	1.10	6.89	5.34	6.28	612	1336±89
P-292		Seco	6	23.52	8.17	3.42	1.10	4.85	4.25	3.58	455	902±66	
		Húmedo	6	11.92	8.76	3.75	1.34	4.49	3.21	6.15	385	1002±171	
28		C. de Amancio	Seco	24	41.67	9.14	5.32	1.30	3.89	4.68	7.19	428	1173±88
			Húmedo	23	23.64	8.29	6.45	1.23	3.93	3.76	8.29	384	1183±218
25		P-139	Seco	18	9.91	7.02	2.52	0.59	5.44	1.11	3.57	328	750±121
			Húmedo	20	30.56	6.77	3.18	0.64	5.18	2.06	3.38	362	763±95

**Tabla 3.9 b. Variación de la composición química en períodos seco y húmedo. Las Tunas (continuación)**

No	Sector hidrog	Muestra	Periodo	N	CO <sub>2</sub>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup>	CaCO <sub>3</sub>	TSS
26	Macizo del Cretácico	P-195	Seco	11	27.34	5.72	0.84	0.32	4.61	1.39	0.87	301	523±39
			Húmedo	5	22.38	6.01	0.90	0.33	4.66	1.20	1.37	293	553±24
29		P-45	Seco	7	14.73	3.88	3.79	0.85	1.54	4.57	2.41	403	553±48
			Húmedo	5	14.18	3.44	3.68	0.82	1.60	4.20	2.14	377	511±20
3		P-32	Seco	5	49.48	15.10	15.56	3.37	2.22	5.88	25.93	405	2347±54
			Húmedo	9	43.02	15.53	15.79	2.92	1.72	5.99	26.53	386	2365±67
17		P-248	Seco	37	9.16	3.60	5.06	1.01	3.06	3.27	3.34	317	625±26
			Húmedo	24	9.08	3.61	5.05	1.04	3.07	3.22	3.41	315	628±26
14		Psa. Rincón	Seco	57	17.81	3.67	2.37	0.27	1.69	1.27	3.35	148	447±137
			Húmedo	28	12.35	3.28	2.47	0.48	1.31	1.64	3.28	148	432±146
15		Psa. Cayojo I	Seco	80	8.28	2.90	2.38	0.36	1.22	1.09	3.33	116	393±240
			Húmedo	67	7.26	2.99	2.10	0.36	1.35	1.07	3.03	121	384±221
16		Psa. Cayojo II	Seco	34	7.76	4.19	2.92	0.35	1.51	1.32	4.65	77	529±438
			Húmedo	29	7.48	2.81	1.97	0.31	1.39	1.17	2.74	71	361±156
18		Central Jobabo	Seco	8	24.14	9.92	8.76	0.99	7.02	4.51	8.14	576	1345±134
			Húmedo	15	22.37	10.79	9.81	1.16	6.25	4.56	11	541	1494±216
19		Quinta Planta	Seco	10	21.65	11.22	9.13	0.99	6.35	4.13	11	524	1483±121
			Húmedo	7	10.64	10.97	9.46	0.92	7.36	3.69	10	552	1477±99
21	Edificio Parque	Seco	5	20.96	10.32	3.52	0.77	6.24	3.95	4.43	510	1066±52	
		Húmedo	6	17.24	9.54	3.62	0.67	6.15	3.95	3.73	505	999±57	
23	La Liberia	Seco	8	31.68	11.78	5.88	1.53	7.46	6.21	5.52	684	1018±65	
		Húmedo	4	18.78	11.86	5.98	1.53	7.64	7.00	4.73	732	1017±77	
20	Alba Flores	Seco	13	29.60	10.18	2.72	1.01	3.33	3.66	7	350	1036±77	
		Húmedo	12	14.15	6.37	5.15	0.75	3.60	2.78	5.91	309	849±65	
22	Circunscripción 7	Seco	5	33.66	16.28	5.51	3.98	7.08	4.33	14.35	571	1903±147	
		Húmedo	6	22.65	16.77	5.76	4.88	7.28	4.53	15.59	591	2020±152	
24	Cabec. Colombia	Seco	7	48.34	12.36	3.86	1.36	6.56	2.98	8.05	477	1308±171	
		Húmedo	6	57.07	14.32	4.10	1.34	6.70	2.97	10.10	484	1486±206	
27	MINAZ	Seco	8	21.61	8.17	4.04	0.88	4.22	5.60	3.27	491	911±55	
		Húmedo	5	30.36	8.94	3.89	0.86	4.20	5.43	4.06	482	967±49	
8	P-180	Seco	8	29.50	13.18	3.48	0.73	1.63	4.74	11.01	319	1305±106	
		Húmedo	4	30.20	14.45	3.56	0.83	1.61	5.23	12.00	342	1419±137	

**Tabla 3.12. Fórmulas de las plagioclasas de las formaciones constituidas por areniscas. Las Tunas. (Anexo IX)**

Punto de muestreo	N	$R = \frac{Na}{Ca}$	x	y	x+y	$A = \frac{x}{(x+y)}$	$B = \frac{y}{(x+y)}$	$C = \frac{(x+2y)}{(x+y)}$	$D = \frac{(3x+2y)}{(x+y)}$	$Na_A Ca_B Al_C Si_D O_8$
Acto Manatí	24	21.60	35.21	1.63	36.84	0.96	0.04	1.04	2.96	$Na_{0.96} Ca_{0.04} Al_{1.04} Si_{2.96} O_8$
P-175	68	14.88	17.41	1.17	18.58	0.94	0.06	1.06	2.94	$Na_{0.94} Ca_{0.06} Al_{1.06} Si_{2.94} O_8$
P-180	12	6.96	11.34	1.63	12.97	0.87	0.13	1.13	2.87	$Na_{0.78} Ca_{0.22} Al_{1.22} Si_{2.78} O_8$
P-32	14	13.85	26.32	1.90	28.22	0.93	0.07	1.07	2.93	$Na_{0.93} Ca_{0.07} Al_{1.07} Si_{2.93} O_8$
Alba Flores	25	4.94	7.70	1.56	9.26	0.83	0.17	1.17	2.83	$Na_{0.83} Ca_{0.17} Al_{1.17} Si_{2.83} O_8$
Todos	143	9.77	19.06	1.95	21.01	0.91	0.09	1.09	2.91	$Na_{0.91} Ca_{0.09} Al_{1.09} Si_{2.91} O_8$

Fórmula aproximada:  $Na_{0.91} Ca_{0.09} Al_{1.09} Si_{2.91} O_8$

Relación molar media ( $R = \frac{Na}{Ca}$ ) de las muestras = 9.77

**Tablas 3.13 a. Principales rocas constitutivas del acuífero, la concentración media de TSS (mg/L), el coeficiente de variación del TSS (%), el tipo de agua excluyendo el cloruro de sodio, el grupo de agua asignado y las posibles características del acuífero. Cuenca Tunas Norte. (Anexo X a)**

Formación	Principales rocas constitutivas del acuífero	Muestra	N	Grupo	TSS Medio	CV <sub>TSS</sub>	Tipo de agua excluyendo NaCl	Características posibles del acuífero
Vázquez	Margas, calizas	P-87	101	I	675	24.2	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg	Acuífero carbonatado con gran desarrollo cársico
Vázquez	Margas, calizas	P-104	143	I	626	22.0	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg	Acuífero carbonatado con gran desarrollo cársico
Vázquez	Margas, calizas	P-105	34	I	728	17.3	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg	Acuífero carbonatado con gran desarrollo cársico
Vázquez	Margas, calizas	P-12	30	I	701	8.9	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg	Acuífero carbonatado con moderado desarrollo cársico
Vázquez	Margas, calizas	P-19	48	II	831	26.1	HCO <sub>3</sub> -Na>Ca	Acuífero carbonatado con gran desarrollo cársico
Vázquez	Areniscas, diabasas	Acto Manatí	24	III	2768	5.3	HCO <sub>3</sub> -Na	Acuífero de fisura poco agrietado desarrollado en areniscas
Vázquez	Areniscas, diabasas	P-175	68	III	1514	6.5	HCO <sub>3</sub> -Na>Mg	Acuífero de fisura fisura poco agrietado
Vázquez	Areniscas, diabasas	El Cocal II	25	III	1902	14.4	HCO <sub>3</sub> -Mg>Na	Acuífero de fisura fisura moderadamente agrietado
Vázquez	Areniscas, diabasas	P-53	52	III	1184	28.8	HCO <sub>3</sub> -Mg>Na	Acuífero de fisura fisura agrietado
Pto Padre	Calcarenitas	Siete Aulas	13	III	2009	8.2	HCO <sub>3</sub> -Na>Mg>Ca	Acuífero calcáreo poroso con moderado desarrollo cársico
Pto Padre	Calcarenitas	Reparto Militar	9	III	2211	4.4	HCO <sub>3</sub> -Na>Mg>Ca	Acuífero calcáreo poroso con poco desarrollo cársico

**Tabla 3.13 b. Principales rocas constitutivas del acuífero, la concentración media de TSS (mg/L), el coeficiente de variación del TSS (%), el tipo de agua excluyendo el cloruro de sodio, el grupo de agua asignado y las posibles características del acuífero. Cuenca Sur de Las Tunas. (Anexo X b)**

Formación	Acuífero	Muestra	N	Grupo	TSS Medio	CV <sub>TS</sub> s	Tipo de agua excluyendo NaCl	Características posibles del acuífero
Yayal	Calizas	P-139	38	I	800	14.0	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg	Acuífero carbonatado con gran desarrollo cársico
Arroyo Palma	Calizas	Carretera Amancio	47	I	1553	13.1	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg	Acuífero carbonatado con gran desarrollo cársico
Güines	Calizas	P-292	12	I	953	14.1	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg	Acuífero carbonatado con gran desarrollo cársico
Güines	Calizas	Las Maboas	22	I	1173	9.6	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg	Acuífero carbonatado con moderado desarrollo cársico

**Tabla 3.13 c. Principales rocas constitutivas del acuífero, la concentración media de TSS (mg/L), el coeficiente de variación del TSS (%), el tipo de agua excluyendo el cloruro de sodio, el grupo de agua asignado y las posibles características del acuífero. Macizo Hidrogeológico del Cretácico. (Anexo X c)**

Formación	Acuífero	Muestra	N	Grupo	TSS Medio	CV <sub>TSS</sub>	Tipo de agua excluyendo NaCl	Características posibles del acuífero
Jimaguayú	Calizas	P-195	16	I	533	6.9	HCO <sub>3</sub> -Ca	Acuífero carbonatado con poco desarrollo cársico
Contramt	Areniscas, calizas	Presa Cayojo I	147	II	385	59.6	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg>Na	Flujo superficial (agua de presa)
Contramt	Areniscas, calizas	Presa Cayojo II	63	II	445	75.3	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg>Na	Flujo superficial (agua de presa)
Contramt	Areniscas, calizas	Presa Rincón	84	II	441	31.5	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg>Na	Flujo superficial (agua de presa)
Contramt	Areniscas, calizas	P-248	60	I	1281	4.1	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg	Acuífero carbonatado con poco desarrollo cársico
Contramt	Areniscas, calizas	Central Jobabo	23	I	1438	14.3	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg	Acuífero carbonatado con moderado desarrollo cársico
Contramt	Areniscas, calizas	Quinta Planta	17	I	1481	7.4	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg	Acuífero carbonatado con moderado desarrollo cársico
Guáimaro	Lavas, tobas, calizas	Edif. Parque	10	I	1030	6.1	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg	Acuífero carbonatado con poco desarrollo cársico
Guáimaro	Lavas, tobas, calizas	La Siberia	12	I	1354	8.7	HCO <sub>3</sub> -Ca>Mg	Acuífero carbonatado con moderado desarrollo cársico
Guáimaro	Lavas, tobas, calizas	Circunscrip.7	11	II	1968	7.9	HCO <sub>3</sub> -Na>Ca	Acuífero carbonatado con moderado desarrollo cársico
Guáimaro	Lavas, tobas, calizas	Cabecera de Colombia	13	II	1391	14.5	HCO <sub>3</sub> -Ca>Na	Acuífero carbonatado con moderado desarrollo cársico
Guáimaro	Lavas y tobas	Alba Flores	25	III	977	7.0	HCO <sub>3</sub> -Na>Mg	Acuífero de fisura fisura moderadamente agrietado
Iberia	Areniscas, diabasas	P-180	12	III	1338	8.7	HCO <sub>3</sub> -Na>Mg	Acuífero de fisura fisura moderadamente agrietado
Caobilla	Tobas	P-32	14	III	2336	2.6	HCO <sub>3</sub> -Na>Mg	Acuífero de fisura fisura poco agrietado
Guáimaro	Lavas, tobas, calizas	MINAZ	13	IV	933	6.2	HCO <sub>3</sub> -Mg>Ca	Acuífero de fisura fisura moderadamente agrietado
Yáquimo	Margas, calizas, tufitas	P-45	12	IV	462	7.9	HCO <sub>3</sub> -Mg>Ca	Acuífero de fisura fisura moderadamente agrietado