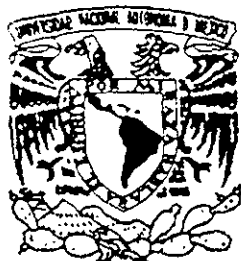


Sancti 03060
9
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

INSTITUTO DE GEOLOGÍA
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE
AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL DEL ACUÍFERO
COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

T E S I S

PARA OPTAR POR EL GRADO DE MAESTRA EN CIENCIAS
(AGUAS SUBTERRÁNEAS)

PRESENTA

EVA SÁNCHEZ RAMÍREZ

Ciudad Universitaria

Diciembre, 1999.

TESIS CON
FALLA DE ORIENTE

774256



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los Doctores Birgit Steinich y Luis Marin su invaluable apoyo, la enorme confianza que ambos depositaron en mi y en mi trabajo, así como todos sus útiles consejos en la elaboración de esta tesis y sobre todo les agradezco el poder contar con su amistad. Especialmente le agradezco a Birgit su valiosa ayuda y las facilidades e información otorgadas para este proyecto.

A las Doctoras Christina Siebe y María Aurora Armienta por sus observaciones, comentarios y útiles consejos.

Al Maestro Faustino Juárez por su apoyo técnico y profesional en la realización de los análisis de laboratorio y por la orientación y sugerencias para mejorar mi trabajo.

A la Doctora Patricia García de la Facultad de Química, por sus consejos y sugerencias, los cuales facilitaron mi actividad en el laboratorio y por ayudarme a recordar que la obtención de buenos resultados, además de trabajo continuo, es cuestión de paciencia.

Agradezco al Departamento de Edafología y al LUGIS las facilidades brindadas para utilizar sus laboratorios y equipos.

A Isabel Simón por su invaluable compañía en los buenos y malos momentos, por todo lo que compartimos y por su ayuda técnica y en el trabajo; a Andrés Chavarría por sus bromas, apoyo técnico, momentos compartidos y la ayuda brindada, a Erika Rionda por el tiempo compartido, a Mireya Hinojosa por su gran apoyo y compañía en todo momento, a Carlos Fuentes por su ayuda y compañía, a mis compañeros del posgrado: Magdalena, Wilson, Leners y Marino por no dejarme trabajar sola, por todas las pláticas, bromas y buenos momentos que compartimos y sobre todo por su amistad.

A Norma Bravo por su invaluable ayuda y apoyo brindados, a Araceli Chaman por su valioso apoyo administrativo, a ambas por el tiempo compartido.

Un agradecimiento muy especial es para Alberto Corral, mi esposo, quien ha sido un estímulo para alcanzar esta meta y seguir adelante, por su apoyo y confianza y por levantarme el ánimo y darme fortaleza.

RESUMEN

Se realizó el análisis e interpretación química de un muestreo de aguas de la parte superficial de un segmento de un acuífero costero libre en el estado de Chiapas, el cual se localiza en una planicie con ligera inclinación hacia el mar, con depósitos superficiales del Cuaternario y Plioceno y un basamento formado por rocas ígneas y metamórficas del Precámbrico y Paleozoico.

Se analizaron y procesaron 60 muestras de agua. Se empleó muestreo con volúmenes pequeños y se efectuaron análisis químicos por potenciometría, cromatografía de iones y espectrometría de absorción atómica.

Se propone una división del área de estudio, incluyendo la zona de recarga, con base en la distribución de suelos. Con esta división se establece la influencia que tienen los suelos sobre algunos parámetros físicoquímicos y químicos del acuífero. Los índices de saturación de las fases minerales presentes en el área de estudio, así como la clasificación de las familias de agua, avalan esta propuesta. Se establece que la hora de muestreo repercute en la temperatura del agua subterránea en los primeros cinco metros del acuífero.

Los resultados del análisis iónico de las muestras de agua subterránea y la posición de la interfase agua dulce – agua salobre, apoyan la teoría de que la geometría del acuífero juega un papel importante en la tendencia de distribución de concentraciones de los iones principales y de parámetros tales como el pH.

Los valores de concentración de nitratos y nitritos indican que en el área de estudio existe un problema de calidad del agua, que puede generar problemas de salud en la población humana y animal de las localidades involucradas. Para conocer el origen del ion nitrato en la zona, se requieren estudios adicionales.

INDICE

RESUMEN	iii
Lista de Cuadros	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Marco Físico	4
1.2.1 Clima	4
1.2.2 Límites geomorfológicos	5
1.3 Geología	7
1.4 Suelos	9
1.5. Hidrología	14
2. METODOLOGÍA	18
2.1 Muestreo	18
2.2 Análisis químico	20
2.2.1 Control de calidad para los análisis químicos	21
2.3 Modelación hidrogeoquímica	24
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	25
3.1 División del área de estudio	25
3.2 Temperatura	28

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

3.3 pH	30
3.4 Análisis iónico	35
3.5 Fases minerales	41
3.6 Concentración de nitratos	46
3.7 Concentración de nitritos	49
3.8 Familias de agua	52
3.9 Interfase agua dulce – agua salobre.	55
4. CONCLUSIONES	59
REFERENCIAS	61

Lista de Cuadros

Cuadro 1.	Origen de los suelos del área de estudio	12
Cuadro 2.	Tipos de suelo en el área de estudio, clasificación FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations)	27
Cuadro 3.	Resultados obtenidos en el programa PHREEQC	44

Lista de Figuras

Figura 1. Área de estudio, ciudades y ríos principales y localización de los puntos de muestreo.	2
Figura 2. Mapa edafológico	11
Figura 3. Localización de las secciones de resistividad	16
Figura 4. Modelos de la geometría del acuífero	17
Figura 5. Curvas de calibración y verificación de estándares de aniones y cationes	23
Figura 6. Zonificación del área de estudio con base en la distribución de suelos	26
Figura 7. Dependencia de la temperatura con la hora de muestreo y polinómica de corrección	28
Figura 8. Isolíneas de temperatura corregida	29
Figura 9. Isolíneas de pH y muestras fuera del rango aceptable para agua de consumo humano	31
Figura 10. Líneas de isoconcentración de alcalinidad	35
Figura 11. Isolíneas de concentración del ion cloruro	37
Figura 12. Isolíneas de concentración del ion sulfato	38
Figura 13. Isolíneas de concentración del ion calcio	39
Figura 14. Isolíneas de concentración del ion magnesio	39
Figura 15. Isolíneas de concentración del ion sodio	40
Figura 16. Isolíneas de concentración del ion potasio	41
Figura 17. Índices de saturación de algunas fases minerales presentes en el área de estudio	43

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

Figura 18. Isolíneas de concentración del ion nitrato	47
Figura 19. Isolíneas de concentración del ion nitrito	49
Figura 20. Diagramas de Piper para las tres zonas y para el área de estudio (global).	53
Figura 21. Distribución espacial de las familias de agua.	54
Figura 22. Isolíneas de conductividad eléctrica	57
Figura 23. Líneas de concentración de sólidos totales disueltos en miligramos por litro (mg/L)	57

Lista de Tablas

Tabla 1.	Parámetros determinados en campo.	65
Tabla 2.	Resultados de los análisis químicos en miligramos por litro (mg/L)	66
Tabla 3.	Resultados de los análisis químicos en miliequivalentes Por litro (meq/L)	68
Tabla 4.	Resultados del porcentaje de error en los análisis químicos.	70
Tabla 5.	Relación SO_4 / Ca (x 1000).	71
Tabla 6.	Clasificación simple de las aguas subterráneas con base en los sólidos totales disueltos (STD).	72

INTRODUCCIÓN

El estudio del agua subterránea es de suma importancia ya que es un recurso que puede pasar de renovable a no renovable, en base al manejo que se haga de él. El estudio de su almacenamiento, circulación y distribución, así como el de sus propiedades físicas y químicas, debe ser complementado con estudios de su interacción con el medio físico y biológico, además de los efectos que tiene sobre el agua subterránea la acción del hombre, incluyendo su explotación.

La zona de estudio se sitúa en el estado de Chiapas, al sureste de México. Este estado colinda al oeste con Oaxaca y Veracruz, al norte con Tabasco, al oriente y sureste con la República de Guatemala y al suroeste con el Océano Pacífico (Figura 1) (INEGI, 1994). Esta zona es de gran importancia económica, ya que corresponde a uno de los distritos agrícolas de la franja costera del estado de Chiapas (CNA, 1997).

De acuerdo a la clasificación que hace la Comisión Nacional del Agua (CNA), el acuífero costero de Acapetahua, es uno de los doce acuíferos del estado de Chiapas y se encuentra en una zona con escasa disponibilidad excedente de agua subterránea, donde se concesionan volúmenes restringidos de agua para usos prioritarios y se tienen en proceso acciones para prevenir la sobreexplotación (CNA, 1997).

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

El acuífero estudiado se abastece de la precipitación que ocurre en la Sierra Madre de Chiapas. Esta zona montañosa, donde la precipitación es abundante y hay una alta incidencia de fenómenos hidrometeorológicos, es el sitio de recarga de este acuífero regional (p. ej. Morales, 1998; Tóth, 1963). De acuerdo con Tóth (1963), es posible que las aguas captadas en este tipo de áreas únicamente pertenezcan a un sistema local de flujo, por lo que se espera que las características químicas del agua sean parecidas a las del agua de la recarga, ya que el tiempo de tránsito es corto y no se permite una mineralización alta, con lo cual se espera tener un acuífero con agua de buena calidad.

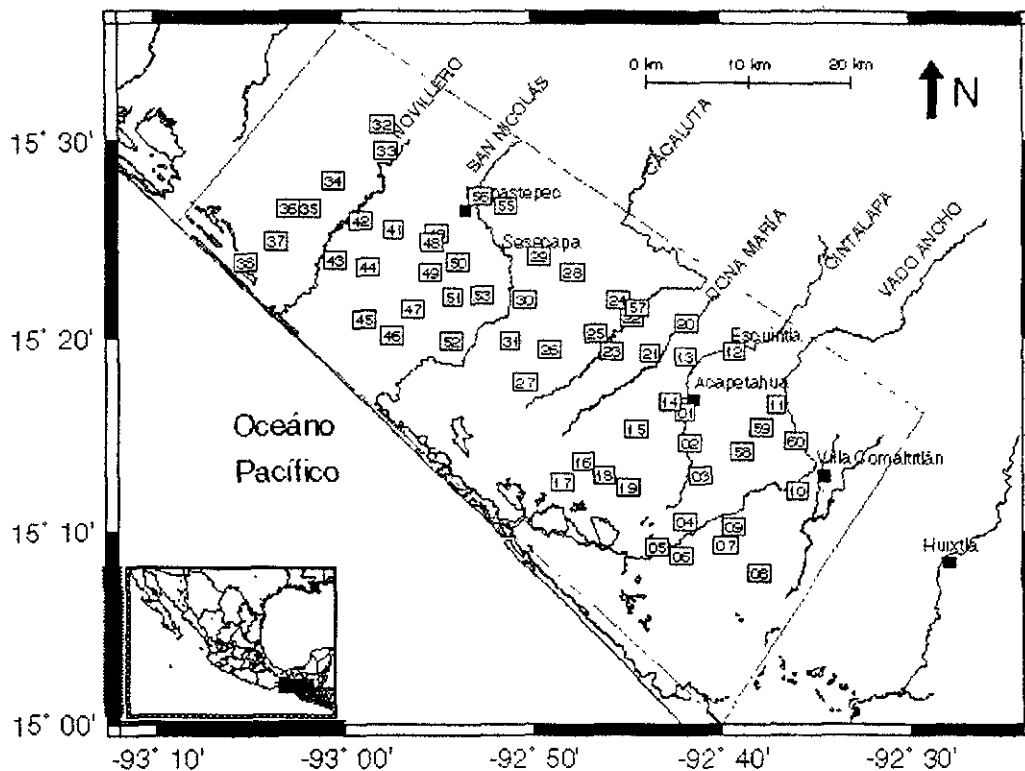


Figura 1. Área de estudio. Ciudades y ríos principales
y localización de los puntos de muestreo.

1.1 Objetivos

Debido a que el agua del acuífero costero del Municipio de Acapetahua, Chiapas es empleada en todas las actividades de la zona, se propone efectuar un estudio hidrogeoquímico de un segmento de este acuífero que genere antecedentes para estudios posteriores.

Por lo anterior se plantea determinar la calidad del agua del acuífero sobre la base de su composición geoquímica.

Debido a que el agua empleada por la población corresponde a la parte subsuperficial o somera del acuífero y por tratarse de un acuífero libre, se propone establecer la influencia de los suelos en la geoquímica del agua subterránea del acuífero.

Con el fin de establecer la posible afectación debida a intrusión marina, se plantea determinar la posición de la interfase agua dulce – agua marina en la zona de estudio.

1.2 Marco Físico

El área de estudio se encuentra localizada entre los 15° 00' y los 15° 35' de latitud norte y entre los -93° 10' y los -92° 25' de longitud oeste (Figura 1), forma parte de la zona fisiográfica conocida como "Planicie Costera del Pacífico", la cual limita hacia el suroeste con el Océano Pacífico y hacia el noreste con la Sierra Madre de Chiapas (Müllerried, 1957).

Se tomaron 60 muestras, procurando que los sitios muestreados quedaran uniformemente distribuidos en el área, la cual tiene una superficie aproximada de 1220 km², 53 km de largo por 23 km de ancho aproximadamente (Steinich y Sánchez, 1998). Se emplearon las cartas topográficas de INEGI (1994) escala 1:50000: D15A29 (Pijijiapan), D15A39 (Palmarcito), D15B21 (Samuel León Brindis), D15B31 (Mapastepec), D15B41 (La Palma), D15A31 (Escuintla) y D15B42 (Huixtla).

1.2.1 Clima

El clima de Chiapas es tropical; el relieve es accidentado y las altitudes modifican la temperatura y la humedad de tal forma que este estado se caracteriza por tener clima variable según sus diferentes regiones (SMN, 1998).

El clima tropical en los terrenos de Chiapas es típico de las bajas altitudes, sin embargo en las zonas de mayor altitud, disminuye la temperatura y aumenta la humedad. Con la distancia al mar generalmente disminuyen las lluvias. Los "nortes" o vientos fuertes que soplan en los meses de octubre a marzo llevan

lluvias hasta el centro del estado e inclusive a las cumbres de la Sierra Madre (Müllerried, 1957).

En la zona de estudio los fenómenos meteorológicos que se presentan son huracanes. En el poblado de Mapastepec (Figura 1) y hacia el sureste del sitio de estudio se presentan tempestades eléctricas (SMN, 1982). Su clima es muy húmedo y lluvioso (tropical húmedo o clima de selva), la precipitación media calculada para el periodo de 1941 a 1996 es de 112 mm para el mes de noviembre (mes en el que se efectuó el muestreo) y de 1982 mm anuales (SMN, 1998). La temperatura media mensual en la zona es de 28.3 °C (SMN, 1998) y la evaporación total mensual se estimó para el año de 1982 en 143 mm (SMN, 1982).

1.2.2 Límites geomorfológicos

Geográficamente, la Planicie Costera del Pacífico del estado de Chiapas es una planicie costera que presenta una ligera inclinación hacia el mar, aun cuando en algunas partes es horizontal, sobre todo cerca de la costa. Esta planicie se continúa tanto hacia la frontera sureste con el vecino país de Guatemala, como hacia el noroeste en el estado de Oaxaca.

La morfología de la Planicie Costera del estado de Chiapas fue descrita por Müllerried (1957) de la siguiente manera: la planicie es esencialmente plana en forma de angosta faja de terrenos planos y muy bajos a lo largo de la costa, con algunos lomeríos en el sureste. En la porción noroeste tiene lomas, cerros pequeños, cerros y serranías. Estos últimos salientes son de rocas ígneas

intrusivas del Precámbrico y Paleozoico, como las que afloran también en la Sierra Madre de Chiapas.

Los límites geomorfológicos de la planicie costera según Morán (1985), son: a) al norte y noreste: la Sierra de Chiapas y la cuenca salina de Chiapas. b) al noroeste: con el llamado domo salino de Nanchital, c) al oeste: con el cerro Pelón, y d) al sur y suroeste: con el océano Pacífico.

El estado de Chiapas de acuerdo a Müllerried (1957) se ha dividido en diferentes zonas, la zona de estudio pertenece a la zona denominada "Planicie o Llanura Costera del Pacífico", la cual se extiende a lo largo de la costa del Pacífico con dirección noroeste a sureste, continuando al oeste - noroeste en terrenos de Oaxaca y al sureste al otro lado de la frontera con Guatemala. Tiene una longitud de 280 km y una anchura de 15 km en el noroeste y de 35 km en el sureste. La zona de estudio corresponde a un segmento de aproximadamente 53 km de largo en la parte central de esta zona y una anchura que va de 24 km en el noroeste a 32 km en el sureste (Figura 1). La planicie se levanta un poco hacia el noreste y en su límite con la Sierra Madre de Chiapas tiene una altitud de sólo 35 metros sobre el nivel del mar. La inclinación de la planicie en la zona de estudio es de 2.5 metros por kilómetro aproximadamente (Steinich y Sánchez, 1998). En la zona existen algunos cerros aislados que se levantan unos 100 metros sobre el nivel medio del mar, sin embargo, en el área de interés, este fenómeno sólo se presenta en la parte suroriental cerca del poblado de Villa Comaltitlán (INEGI, 1994).

1.3 Geología

La reconstrucción que realizan Morán (1985) y Müllerried (1957) de la geología histórica de Chiapas, indica que a finales de la era Paleozoica, hace más de 300 millones de años, el mar cubría todo o parte de lo que actualmente es este estado.

A fines del Precámbrico una intensa orogénesis ocasionó que los estratos marinos se plegaran y metamorfosearan. En la Sierra Madre de Chiapas y en algunas partes de la planicie costera del Pacífico se encuentran afloramientos de las rocas metamórficas e intrusivas pertenecientes a la Era Precámbrica, las cuales son esquistos cristalinos (gneis, micacitas y filitas principalmente) y granitos (Morán, 1985).

Durante el Paleozoico inferior ocurrieron fallamientos en los estratos, producidos por orogénesis, los cuales pueden observarse en algunos lugares de la Sierra Madre de Chiapas (Morán, 1985). En esta era, los terrenos emergidos por la orogénesis del Precámbrico, se hundieron de nuevo en el mar, sin embargo a finales de esta era otro intenso período de orogénesis produjo la elevación del fondo del mar que se convirtió en tierra firme continental o en islas montañosas. De esta era se identifican rocas intrusivas, metamórficas y calizas semicristalinas.

Tanto el suroeste como el noreste de Chiapas que emergieron a fines del Paleozoico, se erosionaron a principios del Mesozoico. Durante el Mesozoico superior y el Terciario inferior y medio ocurrió una depositación de estratos marinos (de hasta 3,500 m de espesor), lo cual indica que este continente o isla volvió a hundirse en el mar. Los estratos marinos del Mesozoico superior afloran en lo alto de la Sierra Madre de Chiapas, al noreste de Motozintla (Morán, 1985; Müllerried, 1957).

Las orogénesis del Terciario fueron acompañadas de salida de magma, con formación de intrusiones dioríticas en las Montañas del Norte y de extrusiones con las que se inició cierta actividad volcánica tanto en la Sierra Madre de Chiapas, como en la Depresión, la Altiplanicie y las Montañas del Norte. Algunos de los volcanes formados (por ejemplo: Tacaná y Chichón) muestran actividad en la época actual. Al noroeste del Tacaná en el Soconusco hay cerros volcánicos erosionados que tienen cráteres bien conservados (Morán, 1985; Müllerried, 1957).

La formación geológica principal de la planicie costera del Pacífico, de la cual forma parte la zona de estudio, consiste en depósitos superficiales del Cuaternario y Plioceno de estratos horizontales. Estos depósitos consisten en capas de arcilla, arena y guijarros de origen diverso, terrestre, lacustre y fluvial. Al poniente de Tapachula hay capas o material de tobas y arenas volcánicas, derivadas de los volcanes que se levantan en la cercana Sierra Madre de Chiapas en esta parte del Soconusco.

En la zona de lagunas y esteros hay depósitos arcillosos o lutíticos que se formaron en las aguas salobres.

Debajo de los depósitos superficiales existen rocas diversas, como esquistos cristalinos y otras rocas metamórficas del Precámbrico y parte del Paleozoico, que corresponden a las rocas de los cerros que se encuentran en el noroeste de la planicie costera del Pacífico (Morán, 1985; Müllerried, 1957).

Lo anterior indica que sobre las rocas del Precámbrico y Paleozoico de la planicie costera del Pacífico yacen superpuestos directamente sedimentos del Plioceno y Cuaternario. Existe un vacío cronológico en la planicie costera del Pacífico, ya que hasta la fecha no se han encontrado estratos del Mesozoico y Terciario inferior y medio, presentes en otras partes de Chiapas (Müllerried, 1957).

El relieve actual del estado de Chiapas es obra de la denudación y la sedimentación durante el Plioceno y el Cuaternario. Los depósitos continentales de estos periodos cubren casi completamente tanto la planicie costera del Pacífico como la del Golfo, y se encuentran también en las otras regiones del estado.

Las lomas y cerros que se encuentran en el noroeste de la planicie costera del Pacífico son del mismo tipo de roca que aflora en la Sierra Madre de Chiapas (pizarras cristalinas, granito y caliza) (Müllerried, 1957). Los lomeríos del sureste están formados por depósitos recientes que incluyen materiales volcánicos, semejantes a los cercanos a la Sierra Madre y al Tacaná, lo que indica que estos lomeríos están relacionados con formaciones continentales en parte volcánicas de edad reciente (Müllerried, 1957).

La superficie de la planicie muestra depósitos muy recientes de arcilla, arena y guijarros, que son depósitos fluviales originados por los muchos ríos y arroyos que la surcan (Müllerried, 1957).

1.4 Suelos

Según Tamayo (1962), la planicie costera está uniformemente cubierta por suelos amarillos y migajones rojos del grupo laterítico. Este autor divide la zona en 1) zona sureste, en la que predominan los suelos lateríticos y 2) zona noroeste, en la que predominan suelos arcillo-arenosos grisáceos de espesor reducido. Sin embargo, otros autores (Müllerried, 1957) establecen que los suelos de la parte sureste, debido a la elevada humedad de los terrenos, son suelos de

considerable grosor de terra rosa laterítica (tierra arcillosa de color amarillo o rojo), mientras que en la zona noroeste debido a la menor humedad, los suelos son menos gruesos, amarillos y migajones del grupo laterítico.

De acuerdo con la información que reporta FitzPatrick (1984), se deduce que los migajones del grupo laterítico de la zona noroeste del área de estudio se desarrollan en condiciones aeróbicas y debido a su alto contenido de alófano ($xAl_2O_3 \cdot nSiO_2 \cdot xH_2O$) tienen una elevada capacidad de retención de agua.

Los suelos lateríticos son suelos arcillosos fuertemente intemperizados. Este término tiende a emplearse de forma general independientemente de si el suelo tiene o no laterita (arcilla ferruginosa originada por alteración meteórica de rocas ígneas básicas o ultrabásicas). Estos suelos son duros o se endurecen al ser expuestos al ambiente y están compuestos principalmente por cuarzo (SiO_2), caolinita ($Al_2 Si_2 O_5(OH)_4$), óxidos de hierro y aluminio, cantidades pequeñas de materia orgánica y a veces óxidos de manganeso (FitzPatrick, 1984).

De acuerdo con la carta edafológica editada por el INEGI (1993) (Figura 2), el área de estudio contiene diversas unidades de suelo (nomenclatura FAO –Food and Agriculture Organisation of the United Nations-). Las unidades que caracterizan el área son: Cambisol (suelos que presentan cambios de coloración, estructura y consistencia como resultado de la intemperización *in situ*, tienen composición básica, ultrabásica o calcárea) (FitzPatrick, 1984; Aguilera, 1989), Feozem (suelos de tierra negruzca, sin salinidad elevada ni horizontes cálcicos ($CaCO_3$) o gipsicos ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) que se desarrollan en condiciones aeróbicas) (FitzPatrick, 1984; Aguilera, 1989), Regosol (suelos originados de material no consolidado, sin salinidad elevada, constituyen la etapa inicial de formación de los cambisoles) (FitzPatrick, 1984; Aguilera, 1989), Fluvisol (suelos que aumentan de

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

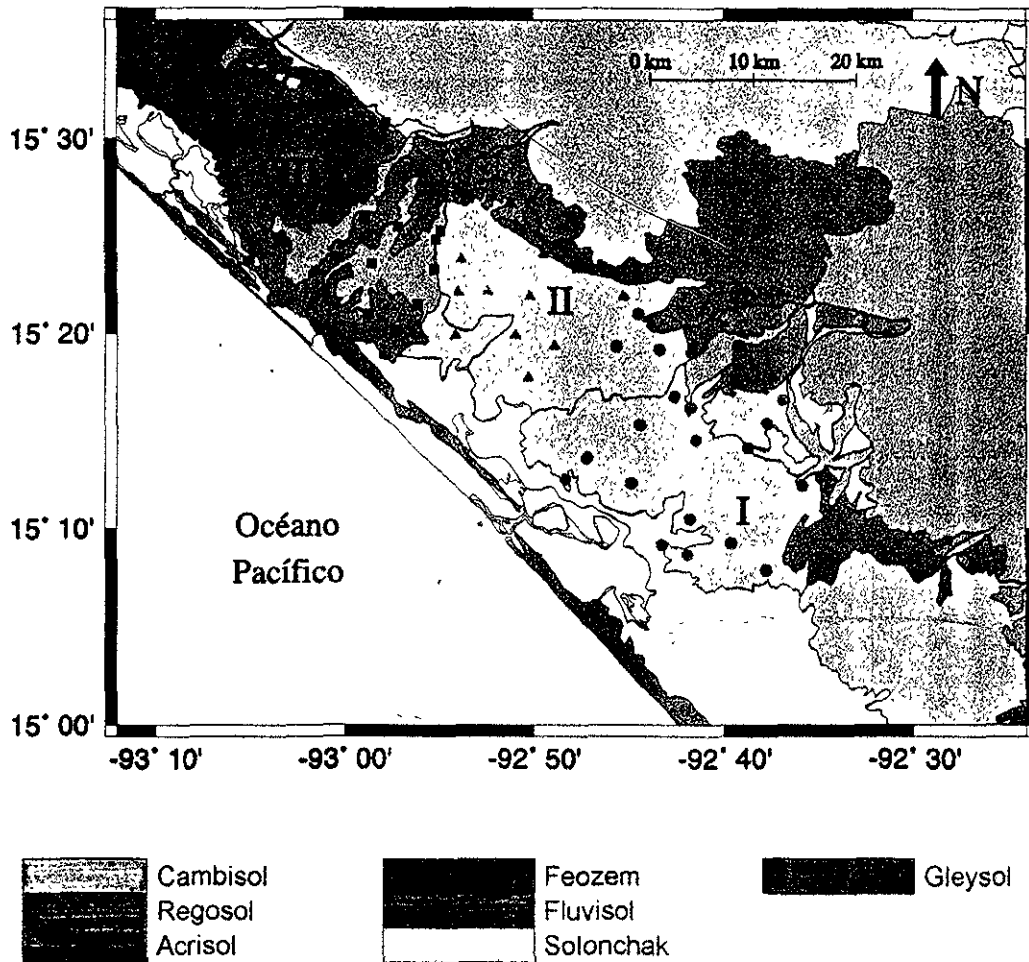
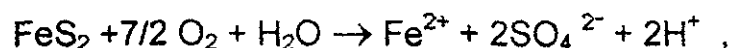


Figura 2. Mapa edafológico de la zona de estudio (INEGI, 1993).

Los números I, II y III corresponden a las zonas en que se dividió el área de estudio. Los círculos, triángulos y cuadrados indican los puntos de muestreo en cada zona.

acidez con la profundidad, la acidez proviene de sus contenidos de hierro, aluminio y magnesio, cuyas proporciones pueden ser tóxicas, tienen un alto contenido de limo y arcilla, son ricos en materia orgánica y manganeso, contienen pirita (FeS_2) que en condiciones aeróbicas se convierte a sulfato (SO_4^{2-}), mediante la siguiente reacción (Postma y otros, 1991):



los Fluvisoles están compuestos también de H₂S, FeS, Al(OH₃), Al₂(SO₄)₃) (FitzPatrick, 1984; Aguilera, 1989) y Gleysol (suelos fangosos por exceso de agua, sin salinidad elevada, el contenido de materia orgánica se estima en 50%, en superficie el pH~4.5 que aumenta con la profundidad, contienen minerales de hierro y Mg, arcillas, carbonatos y yeso) (FitzPatrick, 1984; Aguilera, 1989). La carta indica que en la parte más cercana a la costa se encuentran las unidades Solonchak (suelos costeros salinos) principalmente y Regosol (FitzPatrick, 1984; Aguilera, 1989). Adicionalmente, a lo largo de la costa se encuentran suelos arcillosos, oscuros, con alto contenido de materia orgánica debido a las plantas acuáticas que se desarrollan en lagunas, esteros y arenas (Müllerried, 1957).

Los suelos de la Sierra Madre de Chiapas (Figura 2) que corresponden a la zona de recarga del área de estudio, están compuestos por las unidades Acrisol (suelos ácidos con contenido de materia orgánica menor al 1%, contienen diversas arcillas, minerales de Fe y Al), Regosol, Cambisol y Feozem (FitzPatrick, 1984; Aguilera, 1989).

En el cuadro 1 se presenta una sinopsis del origen de los suelos del área de estudio.

Cuadro 1. Origen de los suelos del área de estudio.

Fuentes: Morán, 1985; Müllerried, 1957; FitzPatrick, 1984; Aguilera, 1989; INEGI, 1993

La división por zonas se explica en el capítulo 3.

Zona	Rocas Basales	Minerales Dominantes	Suelos
Zona I	Igneas: granito, diorita. Matamórficas: esquistos cristalinos, gneis, micacita, filita. Sedimentarias: caliza, arenisca, lutita. Depósitos de hierro y pirita. cobre,	Ortoclasa, cuarzo, feldespatos, albita, anortita, silicatos ferromagnesianos, silice, moscovita, montmorillonita, illita, calcita, dolomita, limo. Cobre y hierro.	Cambisol-Feozem-Regosol

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

Cuadro 1. Origen de los suelos del área de estudio. Continuación.

Fuentes: Morán, 1985; Müllerried, 1957; FitzPatrick, 1984; Aguilera, 1989; INEGI, 1993

La división por zonas se explica en el capítulo 3.

Zona	Rocas Basales	Minerales Dominantes	Suelos
Zona II	<p>Igneas: granito, diorita.</p> <p>Matamóficás: esquistos cristalinos, gneis, micacita, filita.</p> <p>Sedimentarias: caliza, arenisca, lutita.</p> <p>Al(OH)₃. FeS</p>	<p>Ortoclasa, cuarzo, albita, anortita, feldespato, silicatos ferromagnesianos, jarosita potásica, silice, calcita, dolomita, arcillas, micas, Al(OH)₃, FeS.</p>	Cambisol-Regosol-Fluvisol-Feozem
Zona III	<p>Igneas: granito, diorita.</p> <p>Matamóficás: esquistos cristalinos, gneis, micacita, filita.</p> <p>Sedimentarias: caliza, arenisca, lutita.</p> <p>Yeso, hierro.</p>	<p>Ortoclasa, cuarzo, albita anortita, silicatos ferromagnesianos, silice, calcita, dolomita, limo, arcillas, yeso.</p>	Regosol-Cambisol-Fluvisol-Gleysol
Recarga zonas I, II y III	<p>Igneas: granito, diorita.</p> <p>Matamóficás: esquistos cristalinos, gneis, micacita, filita.</p> <p>Sedimentarias: caliza, arenisca, lutita.</p> <p>Zonas II y III: Alófano.</p>	<p>Ortoclasa, cuarzo, feldespatos, albita anortita, silicatos ferromagnesianos, silice, moscovita, montmorillonita, illita, calcita, dolomita, limo.</p>	<p>Recarga zona I: Acrisol-Regosol</p> <p>Recarga zonas II y III: Cambisol-Acrisol</p>
Recarga en Río Cacaluta	<p>Igneas: granito, diorita.</p> <p>Matamóficás: esquistos cristalinos, gneis, micacita, filita.</p> <p>Sedimentarias: caliza, arenisca, lutita.</p>	<p>Ortoclasa, cuarzo, feldespatos, albita anortita, silicatos ferromagnesianos, silice, moscovita, montmorillonita, illita, calcita, dolomita, limo.</p>	Cambisol-Feozem-Regosol

1.5 Hidrología

La hidrología de la planicie costera del Pacífico está caracterizada por la abundancia de agua debido a su posición geográfica. El agua superficial de la planicie costera, casi en su totalidad proviene del agua de lluvia. En la zona de estudio no hay manantiales (Müllerried, 1957). Las cumbres de la Sierra Madre de Chiapas son el parteaguas de este estado; esta Sierra se extiende en una dirección noroeste - sureste y en ella nacen todos los ríos y arroyos que atraviesan la planicie costera de noreste a suroeste y desembocan en el mar o en las lagunas, esteros y pantanos que se encuentran a lo largo de la costa y que a su vez se comunican con el océano (Müllerried, 1957).

En la zona de estudio se encuentran ríos perennes e intermitentes o estacionales. Los ríos de tipo perenne que existen en esta zona son: río Novillero, río San Nicolás, río Cacaluta, río Doña María, río Cintalapa y río Vado Ancho, los cuales se mencionan de noroeste a sureste (INEGI, 1994) y se presentan en la figura 1.

En una franja angosta de la planicie costera, en la línea costera y paralela a ella, se estanca el agua superficial, formándose lagunas cuyo nivel corresponde al nivel medio del mar. Esta franja de lagunas no es continua en toda la extensión de la costa. Aparte de estos cuerpos de agua, se encuentran pantanos y lagunas de poco fondo. Los pantanos tienen agua dulce o salobre, mientras que las lagunas son siempre de agua salobre o salada (Müllerried, 1957).

El agua subterránea de la zona de estudio procede del agua meteórica (Müllerried, 1957). La principal zona de recarga se encuentra localizada en la

pendiente suroeste de la Sierra Madre de Chiapas, la cual es una zona de clima tropical húmedo (lluvioso) y cálido con invierno y primavera secos (Müllerried, 1957). El agua se almacena en las arcillas, lutitas, margas y calizas margosas y puede ser extraída mediante pozos o norias. (Müllerried, 1957).

De acuerdo con la información que reporta la CNA (1997), el acuífero costero del Municipio de Acapetahua, es un acuífero con escasa disponibilidad excedente de agua subterránea, del cual se concesionan volúmenes restringidos de agua para usos prioritarios.

El segmento estudiado del acuífero costero de Acapetahua está constituido de materiales porosos compuestos de sedimentos continentales del Plioceno y Cuaternario que fueron depositados por los diferentes ríos que nacen en la Sierra Madre de Chiapas y atraviesan la Planicie costera, transportando el material erosionado de la sierra hacia la planicie, lo que hace probable que la porosidad en este segmento del acuífero tenga variaciones en las direcciones horizontal y vertical. No hay evidencia de capas confinantes por lo que el segmento estudiado del acuífero se considera libre y a escala regional puede describirse como una sola unidad hidroestratigráfica.

La profundidad del basamento cristalino junto con la topografía permiten estimar la geometría y el volumen del segmento estudiado del acuífero (Steinich y otros, 1999). Por medio de sondeos eléctricos verticales de tipo 'Schlumberger' realizados por estos autores, se determinó que la profundidad del basamento en el área de estudio varía entre unos pocos metros hasta algunos cientos de metros.

Steinich y otros (1999) estudiaron la profundidad del basamento para el segmento estudiado del acuífero, en la figura 3 se presentan a manera de ejemplo dos de las secciones tomadas en dicho estudio, la figura 4 muestra los modelos obtenidos de la geometría del acuífero en el área de estudio para las secciones

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

mencionadas, en estos modelos puede observarse que la geometría se caracteriza por un basamento que es una continuación de la topografía de la Sierra Madre de Chiapas.

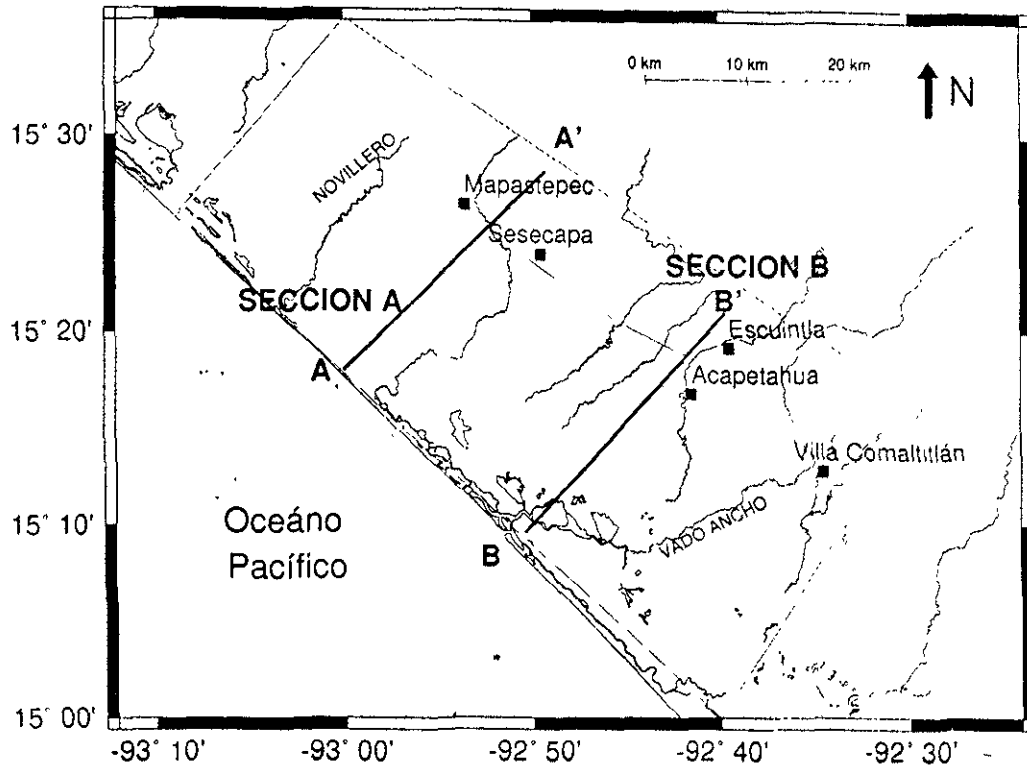


Figura 3. Localización de las secciones de resistividad.

Las crestas o zonas de menor profundidad del basamento que reducen el espesor del acuífero se encuentran a una distancia de cuatro km a partir de la línea de costa para la sección A-A' y a una distancia de 11 km para la sección B-B'. En el área de estudio ninguna de estas crestas se ve en superficie (Figura 4) (Steinich y otros, 1999).

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

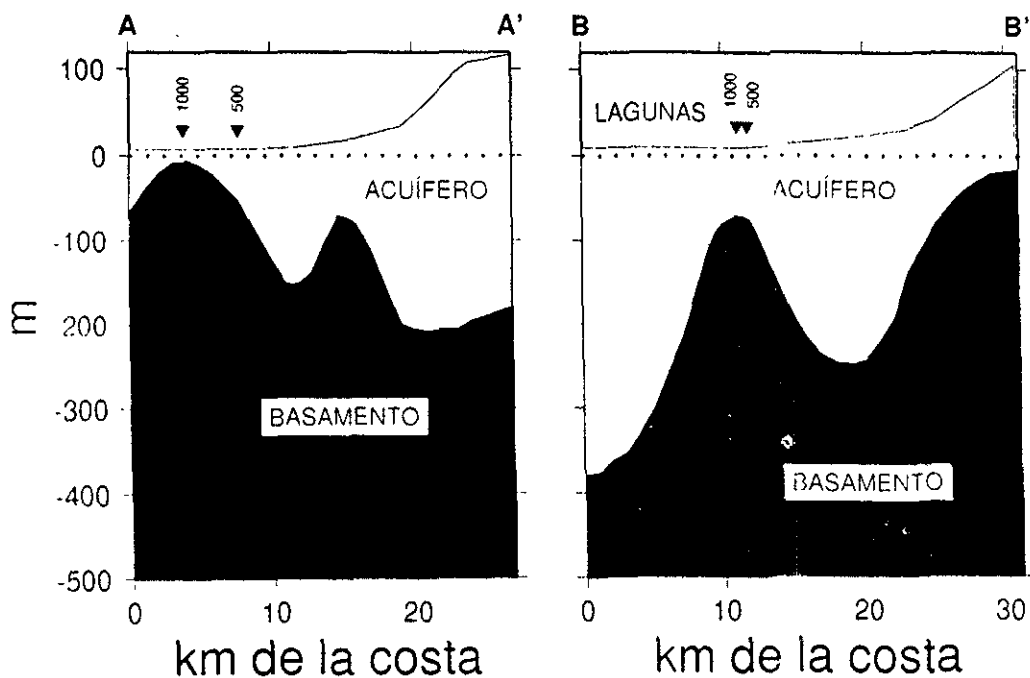


Figura 4. Modelos de la geometría del acuífero para las secciones A-A' y B-B', ver figura 3 para localización.

Los valores sobre las flechas corresponden a los sólidos totales disueltos en mg/L. El eje de las ordenadas representa la profundidad.

Modificado de Steinich y otros (1999).

METODOLOGÍA

2.1 Muestreo

El estudio se basa en un muestreo de agua de un segmento del acuífero realizado en noviembre de 1997.

De los 60 sitios de muestreo, 57 puntos corresponden a norias y las tres restantes corresponden a ríos (muestras 56, 57 y 60). Cinco muestras fueron tomadas por duplicado como parte del control de calidad. La localización de los sitios muestreados se encuentra en la figura 1.

En el muestreo se usaron vacutainers fabricados con vidrio libre de impurezas, cerrados al vacío y con un volumen de drenado de 10 ml. Se emplearon tres vacutainers por muestra y sitio, uno para aniones y dos para cationes (Sánchez, 1997a). Las muestras tomadas para análisis de cationes fueron acidificadas con ácido nítrico (Custodio y Llamas, 1983) en el laboratorio de geoquímica del Instituto de Geología de la UNAM, la acidificación no se realizó en campo debido a que el ácido estaba contaminado.

La mayor parte de los pozos no contaban con bomba instalada, por lo que las muestras fueron obtenidas mediante el uso de un bailer, el cual fue

descendido hasta el fondo de los pozos. Este método evita el arrastre de agua de niveles superiores y permite que el agua circule sin mezcla. La primera inmersión del bailer sirvió para establecer la profundidad a la que se encontraba la base del pozo y para enjuagar el bailer con el agua a muestrear (Custodio y Llamas, 1983); las siguientes inmersiones fueron empleadas para obtener la muestra. Para el muestreo de las aguas de los ríos, se empleó el mismo método. Las muestras tomadas corresponden a la parte somera del acuífero, donde la profundidad de muestreo fue de alrededor de cinco metros.

Para los casos en los que los pozos contaban con bomba instalada, la toma de muestras se hizo a través de esta. Se dejó correr el agua por cinco minutos, para extraer el agua reemplazable en las tuberías y asegurar que la muestra no hubiera perdido gases, hubiera tomado o perdido oxígeno, tuviera residuos del ataque a tuberías y/o presentara diferencias notables en temperatura con respecto a la temperatura del acuífero, y asegurar así la representatividad de la muestra.

La temperatura y el pH fueron medidos en campo con un potenciómetro con detector de temperatura marca Cole-Palmer y la conductividad eléctrica fue medida con un conductímetro con detector de temperatura marca Conductronic. El potenciómetro fue calibrado con soluciones buffer de pH 7.0, 4.0 y 10.0 consecutivamente, mientras que el conductímetro fue calibrado con una solución 0.01 molar de KCl.

La alcalinidad fue determinada en el sitio muestreado por el método de Gran, mediante el empleo de un titulador digital (Hach kit) con H_2SO_4 1.6 N (Drever, 1998) y el potenciómetro Cole-Palmer.

Todas las muestras fueron filtradas mediante un sistema de jeringa hipodérmica de uso médico con capacidad de 60 ml, portafiltros de polisulfona con diámetro de 25 mm, membrana desechable de nylon con diámetro de poro de

0.22 μm (una membrana por muestra) y aguja de uso médico. La filtración se efectuó para evitar la presencia de sólidos suspendidos (tales como partículas de CaCO_3) y de bacterias (Custodio y Llamas, 1983). La técnica empleada en el filtrado, consistió en conectar la jeringa de 60 ml a la parte anterior del portafiltro (previamente preparado con la membrana) y la aguja en la parte posterior del mismo. Una vez que este sistema fue enjuagado con una cantidad abundante de la muestra (60 ml), se procedió a insertar la aguja en los vacutainers para llenarlos.

2.2 Análisis químico

Los análisis químicos se realizaron en laboratorios del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Los análisis de aniones (Cl^- , NO_2^- , NO_3^- y SO_4^{2-}) se efectuaron en el laboratorio de química del Departamento de Geoquímica, empleando un cromatógrafo de iones marca Thermo Separation Products. La técnica utilizada fue descrita por Sánchez (1997b). La cuantificación de cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+) se realizó en un laboratorio del Departamento de Edafología, y se realizó mediante el uso de espectrometría de absorción atómica con un equipo de la marca Perkin Elmer modelo 3110.

Se analizaron las 60 muestras tomadas, así como los duplicados. Se eliminaron cinco muestras de los análisis químicos, ya que estas sobrepasaron el

5 % de error en el balance iónico, el cual se calcula mediante la siguiente fórmula (Freeze y Cherry, 1979):

$$E = [(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}) / (\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})] * 100$$

donde:

E : error porcentual de balance de carga

\sum cationes : suma de las concentraciones de cationes en meq/L

\sum aniones : suma de las concentraciones de aniones en meq/L

2.2.1 Control de calidad para los análisis químicos

El control de calidad de los análisis químicos de este estudio se basó en la versión número 2 del QAPP (Quality Assurance Project Plan), del National Center for Integrated Bioremediation Research and Development, de la Universidad de Michigan, Estados Unidos (NCIBRD, 1995).

Este control de calidad consiste en correr un blanco de reactivos antes de cualquier análisis a fin de verificar que el agua y los materiales empleados en este no están contaminados (NCIBRD, 1995).

El blanco de reactivos contiene todos los reactivos que normalmente son inyectados junto con la muestra. En el caso de aniones, este consiste en la solución eluyente (ácido oftálico 3mM, ajustado a pH = 4.9 con borato de sodio) y en el caso de cationes se trata de agua de milli-Q para calcio y magnesio y de solución de LiNO_3 al 5%, para sodio y potasio (Juárez, comunicación personal).

Para los análisis de aniones se efectuó una calibración inicial con 12 estándares (1, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 mg/L) y un blanco (de acuerdo con el QAPP el número mínimo de estándares de calibración es de cinco), con lo cual se obtuvieron regresiones lineales con un valor promedio para el coeficiente de correlación $r^2 = 0.9998$.

En los análisis de cationes se calibró inicialmente con 5 estándares (0, 2, 4, 8 y 10 mg/L), en donde se obtuvieron regresiones lineales con un promedio del coeficiente de correlación $r^2 = 0.9993$.

Estas calibraciones se verificaron periódicamente cada 6 corridas en el análisis de aniones y cada 20 inyecciones en el análisis de cationes. En todos los casos el rango de respuesta de los estándares se encontró en $\pm 5\%$ comparado a las curvas de calibración correspondientes. Algunas de las curvas obtenidas de las calibraciones para aniones y cationes, así como algunas verificaciones se presentan en la figura 5.

En cinco sitios escogidos arbitrariamente se colectaron duplicados de muestras, las cuales fueron analizadas de forma independiente. Esta medida de control de calidad permitió determinar que los resultados obtenidos en los diferentes métodos de análisis empleados, fueron reproducibles a través de un grupo de condiciones dadas (NCIBRD, 1995).

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

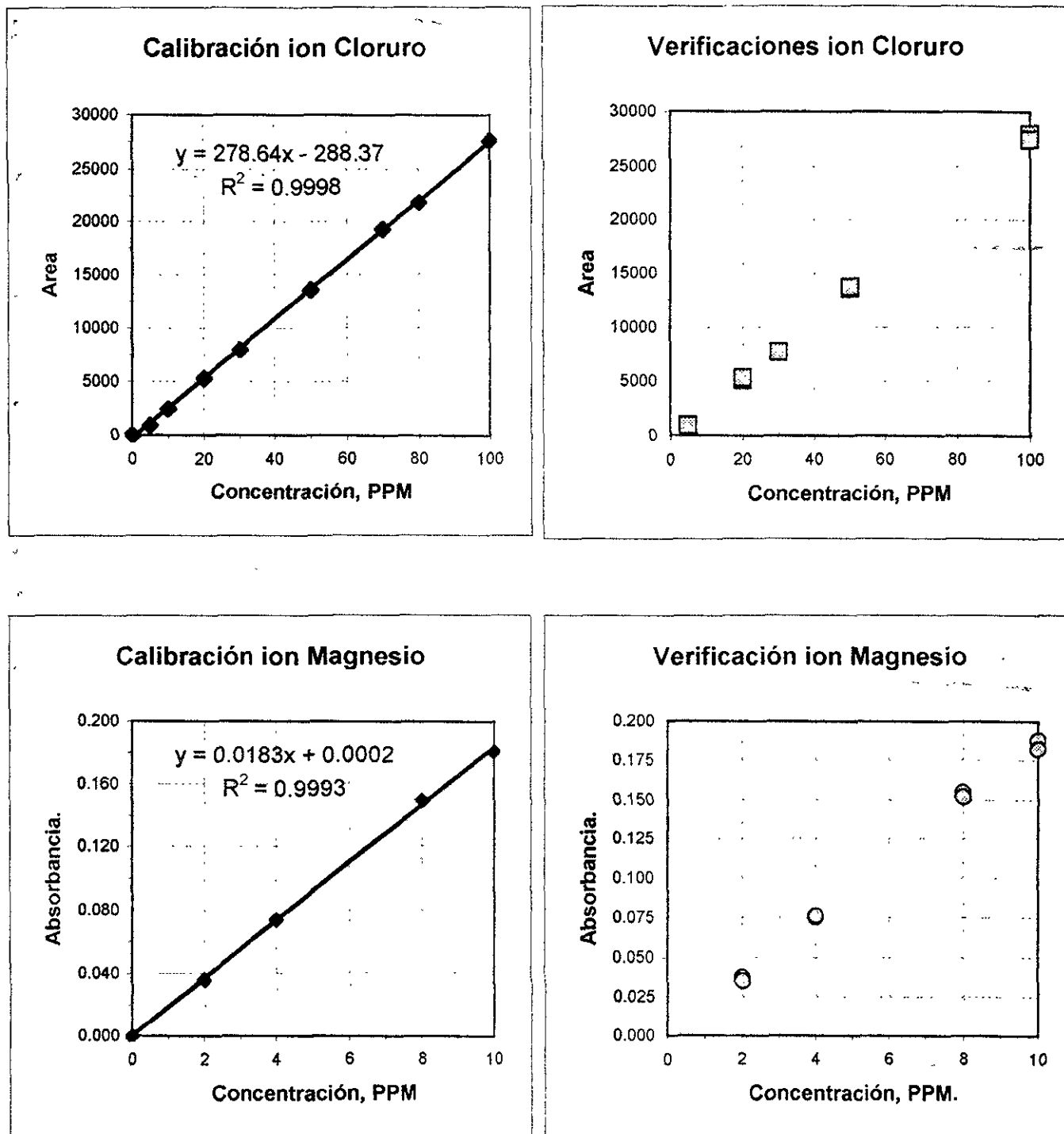


Figura 5. Curvas de calibración y verificación de algunos estándares de aniones y cationes.

2.3 Modelación hidrogeoquímica

En esta parte del estudio se empleó el programa de computadora para cálculos geoquímicos PHREEQC, versión 1.5. La versión empleada en este trabajo fue obtenida a través de Internet del Water Resources Investigations del United States Geological Survey en Lakewood, Colorado (U.S.G.S., 1998).

Tomando como base la composición mineral de cada una de las tres zonas en las que fue dividida el área de estudio (Figura 6) y que se explicará a detalle en el siguiente capítulo, se empleó la subrutina del programa phreeqc para equilibrio mineral "Equilibrium_Phases" (Anónimo, 1995)), con tres diferentes grupos de fases minerales representativos de cada una de las zonas consideradas.

En la zona I se especificó un equilibrio entre las muestras y las fases calcita (CaCO_3), aragonita (CaCO_3) (Figura 17), albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), cuarzo (SiO_2), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), talco ($\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), pirita (FeS_2), mica potásica o moscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) y feldespato potásico u ortoclasa (KAlSi_3O_8). En la zona II el equilibrio especificado fue para las fases: calcita, aragonita, pirita, jarosita potásica ($\text{KFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$), montmorillonita ($\text{Ca}_{0.165}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), illita ($\text{K}_{0.6}\text{Mg}_{0.25}\text{Al}_{2.3}\text{Si}_{3.5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), $\text{Al}(\text{OH})_3$, mica potásica, feldespato potásico, albita, cuarzo, anortita y dolomita. Para la zona III se especificó un equilibrio entre las muestras y las fases calcita, aragonita, pirita, jarosita, montmorillonita, illita, $\text{Al}(\text{OH})_3$, yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Figura 17) y moscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), albita, cuarzo, anortita, dolomita y feldespato potásico. En la modelación se incluyen las fases minerales correspondientes a los suelos y rocas de la zona de recarga del área de estudio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 División del área de estudio

Considerando que las muestras tomadas para este estudio corresponden a la parte superficial de un segmento de un acuífero libre, la cual se encuentra en contacto directo con los suelos de la zona, se propone una zonificación del área de estudio en base a la distribución de los suelos. Esta división del área pretende establecer la influencia que ejerce la composición químico-mineral de los suelos sobre los parámetros fisicoquímicos y químicos del segmento del acuífero estudiado. Con la división propuesta y considerando que las zonas comparten características en cuanto a composición mineral, se espera encontrar similitudes entre las mismas tanto en el análisis químico como en la modelación hidrogeoquímica, sin embargo, la principal motivación para efectuar la división del área de estudio en las zonas sugeridas, es la de encontrar diferencias en las tendencias de distribución de los diversos parámetros analizados, en base a las diferencias existentes entre cada una de las zonas establecidas.

De acuerdo con la carta edafológica editada por el INEGI (1993) (Figura 2), se propone que el área de estudio sea dividida en tres zonas con base en las unidades de suelo que las componen. La figura 6 muestra la zona de estudio dividida en: a) Zona I, caracterizada por las unidades de suelo: Cambisol,

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

Feozem y Regosol; b) Zona II, caracterizada por las unidades: Cambisol, Regosol, Fluvisol y Feozem y c) Zona III, que contiene: Regosol, Cambisol, Fluvisol y Gleysol (FitzPatrick, 1984; Aguilera, 1989).

Se propone también que la zona de recarga (Figura 6) sea dividida en; a) Recarga de la zona I formada por las unidades Acrisol y Regosol; b) Recarga de las zonas II y III que contiene las unidades Cambisol y Acrisol y c) Recarga en el río Cacaluta donde predominan las unidades: Feozem, Cambisol y Regosol. El cuadro 2 presenta una sinopsis de los suelos contenidos en cada zona del área de estudio.

El orden en el que se mencionan las unidades de suelo, indica la predominancia, en forma decreciente, de cada unidad de suelo para cada una de las diferentes zonas propuestas.

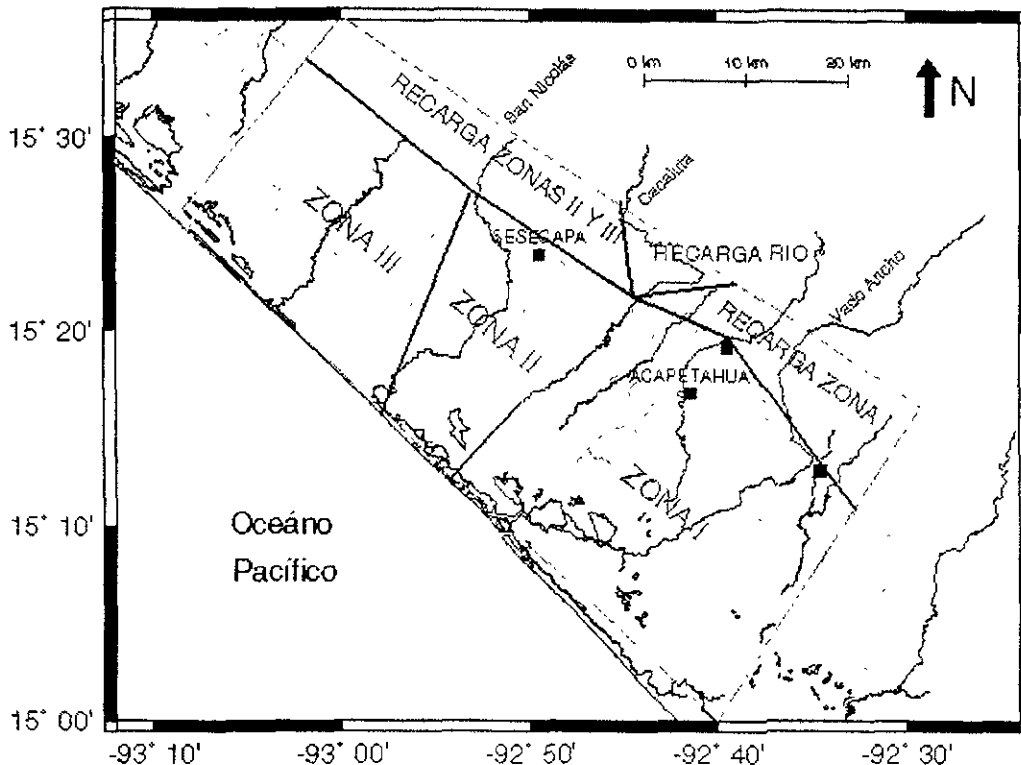


Figura 6. Zonificación del área de estudio en base a la distribución de los suelos.

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

Desglosando los componentes de cada unidad de suelo, incluyendo los suelos de la recarga (ver cuadro 1), se espera que la zona I contenga principalmente calcita (CaCO_3) y aragonita (CaCO_3) (FitzPatrick, 1984. Aguilera, 1989); la zona II además de calcita y aragonita, puede contener pirita (FeS_2), jarosita potásica ($\text{KFe}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$), $\text{Al}(\text{OH})_3$, Fe, Mg, Al, limo y arcilla, esta última con un contenido importante de montmorillonita ($\text{Ca}_{0.165}\text{Al}_{2.33}\text{Si}_{3.67}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) e illita ($\text{K}_{0.6}\text{Mg}_{0.25}\text{Al}_{2.3}\text{Si}_{3.5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) (FitzPatrick, 1984. Aguilera, 1989); por último se espera que la zona III, contenga calcita, aragonita, pirita, jarosita potásica, $\text{Al}(\text{OH})_3$, Fe, Mg, Al, illita, montmorillonita, yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Figura 17) y moscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$) (FitzPatrick, 1984. Aguilera, 1989). Las tres zonas tienen un contenido importante de materia orgánica debido a la vegetación que se desarrolla en el área y por la presencia de desechos humanos y animales (FitzPatrick, 1984. Aguilera, 1989).

Cuadro 2. Tipos de suelos en el área de estudio, clasificación FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations).

Basado en información de INEGI (1993)

ZONA	TIPO DE SUELOS
Zona 1	Cambisol-Feozem-Regosol
Zona 2	Cambisol-Regosol-Fluvisol-Feozem
Zona 3	Regosol-Cambisol-Fluvisol-Gleysol
Recarga zona 1	Acrisol-Regosol
Recarga zonas 2 y 3	Cambisol-Acrisol
Recarga en Río Cacaluta	Cambisol-Feozem-Regosol

3.2 Temperatura

Los valores de la temperatura tomados en campo se presentan en la tabla 1, el rango de temperatura va de 22.20 a 29.20 °C, la temperatura de menor valor corresponde a las aguas de la muestra 56 'Río San Nicolás', mientras que el máximo valor corresponde a la muestra 15 'Mariano Matamoros'.

Tomando en cuenta la hora a la que se tomaron las muestras, la cual se presenta en la tabla 1, se observa que la temperatura medida tiene una fuerte dependencia con la hora de muestreo. La figura 7, presenta la relación de dependencia temperatura contra hora de muestreo.

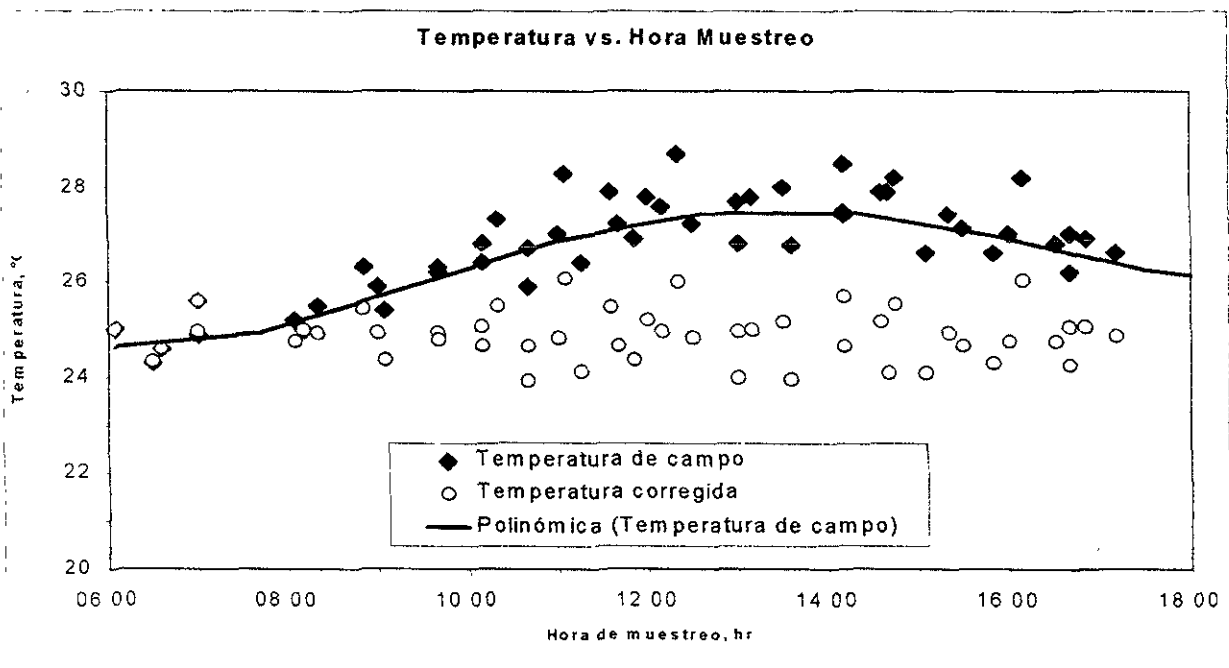


Figura 7. Dependencia de la temperatura con la hora de muestreo y polinómica de corrección.

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

Sobre la base de los valores medidos en campo se ajustó una función de corrección de la temperatura (Figura 7). La polinómica de sexto grado obtenida es:

$$Y = 2 \times 10^{-5} X^6 - 1.2 \times 10^{-3} X^5 + 3.93 \times 10^{-2} X^4 - 9.9 \times 10^{-2} X^3 + 6.9097 X^2 - 35.66 X + 96.359$$

con un factor de correlación $r^2 = 0.9683$.

Los valores medidos se corrigieron con base en el valor mínimo de temperatura en la polinómica con la finalidad de eliminar la influencia de la hora de muestreo sobre la temperatura de la muestra. Con base en los valores corregidos se elaboró el mapa de isolíneas de temperatura (Figura 8).

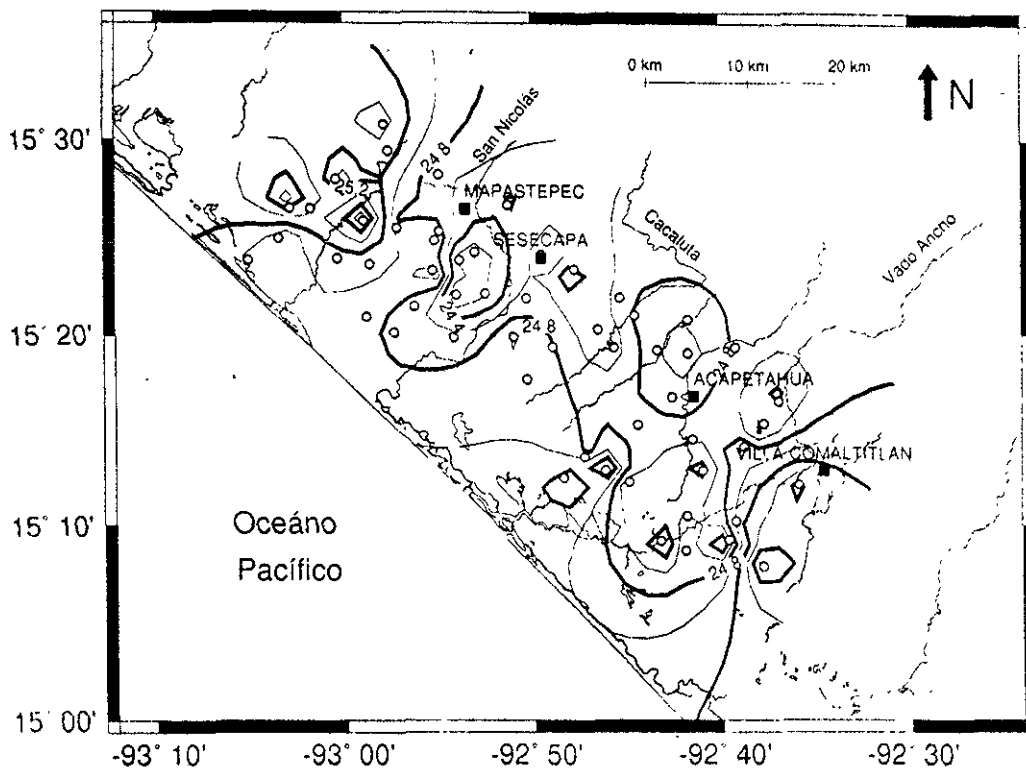


Figura 8. Isolíneas de temperatura corregida.

Al considerar que los suelos del área de estudio son ricos en materia orgánica y que ésta les imprime un color oscuro que favorece que la absorción de la radiación solar sea alta y la reflexión sea baja (McSweeney y Grunwald, 1999), se explica que los suelos del área de interés se calienten rápidamente; si además se considera que las muestras de agua fueron tomadas de la parte superior del acuífero, se corrobora que la temperatura del agua muestreada varía en función de la incidencia solar.

3.3 pH

Los valores medidos de pH en las aguas muestreadas tienen valores que van de 5.20 a 8.31. En la figura 9, se muestran las isolíneas para los valores de pH (Los valores de las aguas superficiales no se consideraron en la interpolación). Los valores más altos de este parámetro corresponden a las muestras 19 'Los Cerritos', 56 'Río San Nicolás', 57 'Río Cacaluta' y 60 'Río Vado Ancho', Estos valores son 7.48, 7.49, 7.34 y 8.31, respectivamente. El rango de valores de pH aceptable en agua para consumo humano es de 6.50 a 8.50 (Faure, 1998). Se encontró que 35 de las 55 muestras (63.64%) consideradas para el análisis de resultados quedan fuera del rango aceptable antes mencionado, siendo sus valores menores a 6.50.

En la figura 9 se muestra la posición espacial de las muestras que se encuentran fuera del rango de pH aceptable para consumo humano. Este patrón espacial muestra que en la zona I la mayoría de las muestras fuera de rango están próximas a la zona de recarga, mientras que las muestras 4 y 5 ('El Arenal'

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

y 'Río Arriba') se encuentran muy cerca y dentro, respectivamente, del estero. Las muestras de la zona II con pH menor a 6.50 también se localizan cerca de la zona de recarga con excepción de la muestra 26 'Rancho Quemado', la cual está localizada cerca de una aceitera que opera en la localidad.

Los valores de pH medidos en las muestras de agua indican la existencia de una relación entre las características del agua y la composición química de los suelos, ya que los suelos que se localizan en las zonas de recarga corresponden a Acrisoles (INEGI, 1993), los cuales son suelos ácidos (FitzPatrick, 1984). Adicionalmente, los suelos de las zonas I y II también son suelos ácidos (INEGI, 1993), mientras que los fluvisoles (zonas II y III) presentan un aumento en la acidez con la profundidad (FitzPatrick, 1984) y los gleysoles (zona III) tienen valores bajos de pH en superficie (pH ~ 4.50) (FitzPatrick, 1984).

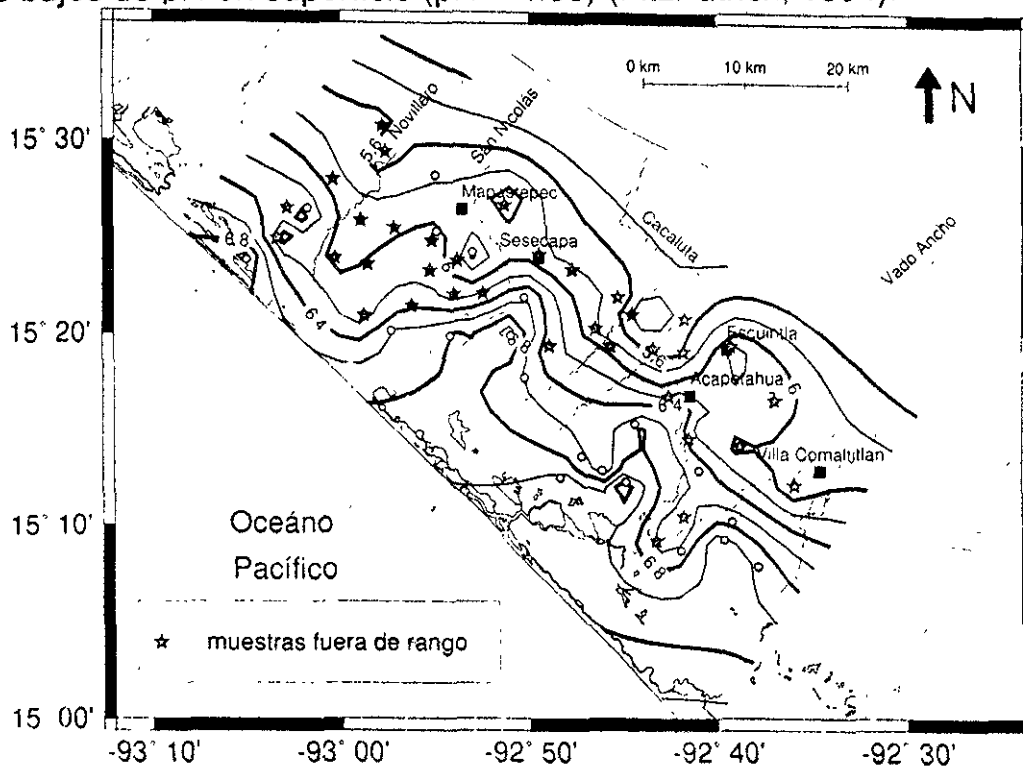
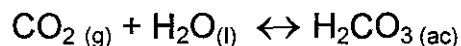


Figura 9. Isoclinas de pH y muestras fuera del rango aceptable para agua de consumo humano.

Por otra parte el CO₂ es uno de los gases disueltos más abundantes en las aguas subterráneas, este gas puede tener una influencia significativa en el ambiente hidroquímico subsuperficial (Freeze y Cherry, 1979).

El contenido de CO₂ en el agua subterránea puede ser el resultado de 1) la exposición de la lluvia a la atmósfera terrestre antes de infiltrarse en el ambiente subsuperficial, 2) Por contacto con gases del suelo durante la infiltración a través de la zona no saturada o 3) Por su producción bajo el nivel freático por reacciones químicas o bioquímicas (Freeze y Cherry, 1979). La interacción entre el CO₂ y el agua subterránea produce ácido carbónico (H₂CO₃) el cual ocasiona una disminución del pH, las reacciones que describen la interacción entre el CO₂ gaseoso y sus especies disueltas son (Freeze y Cherry, 1979):



Se calculó el pH teórico que tendría la disolución del CO₂ atmosférico. Para el cálculo se consideró que la composición del aire a nivel del mar, en tanto por ciento en masa, es aproximadamente: N₂: 75.52; O₂: 23.15; Ar: 1.28; CO₂: 0.046 (Atkins, 1986) y se emplearon las expresiones (Atkins, 1986):

$$P_j = n_j (RT/V) = X_j n RT/V = x_j P \quad , \quad n_j = w_j/M \quad , \quad x_j = n_j / \sum n$$

donde:

P_j: Presión parcial (del componente j)

j: Componente

n: Número de moles

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

- R: Constante de los gases
T: Temperatura
X: Fracción mol
P: Presión
wj: Peso molecular en gramos
M: Molaridad

Obteniendo:

n_{N_2} : 2.70 mol; n_{O_2} : 0.72 mol; n_{Ar} : 0.03 mol y n_{CO_2} : 0.001 mol.

X_{N_2} :0.782; X_{O_2} :0.208; X_{Ar} :0.009 y X_{CO_2} :0.0003.

$P_{CO_2} = X_{CO_2} P$; a nivel del mar $P=1$ atm $\therefore P_{CO_2} = 0.0003$

En la superficie terrestre podemos considerar que $P_{CO_2} \approx f_{CO_2}$

$$\therefore f_{CO_2} = 0.0003$$

@ 28 °C $K_{eq} = 10^{-1.49}$, $K_1 = 10^{-6.34}$, $K_2 = 10^{-10.32}$ (Drever, 1998).

Para la reacción: $CO_{2(g)} + H_2O_{(l)} \rightarrow H_2CO_{3(ac)}$

Con $K_{eq} = \{ H_2CO_3 \} / f_{CO_2} \{ H_2O \} = 10^{-1.49}$ y considerando que $\{ H_2O \} = 1$

Se tiene: $\{ H_2CO_3 \} = 10^{-1.49} f_{CO_2} = 9.71 \times 10^{-6} = 10^{-5.01}$

Para la disolución: $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$

Se obtiene un $\text{pH}_{\text{teo}} = 5.42$

En la zona de estudio se encuentran cantidades considerables de materia orgánica en el suelo, de tal forma que el agua que ocupa los poros del material de la parte somera del subsuelo disuelve CO_2 y ácidos húmicos, por lo que potencialmente puede adquirir un carácter ácido (McSweeney y Grunwald, 1999).

Aunque no se tienen valores de pH del agua de lluvia en la zona de interés, debido a que durante el estudio no ocurrieron precipitaciones, los resultados de la estimación del pH para la disolución del CO_2 atmosférico y los valores de este parámetro que presentan las aguas superficiales, sugieren que los valores de pH de las muestras corresponden a la interacción existente con los suelos del área de estudio.

En el área de estudio, se tienen valores de alcalinidad que van de 27.3 a 642 mg/L. Los valores de alcalinidad de las muestras en mg/L se presentan en la tabla 2. En la figura 10 se muestra el patrón de distribución de las isóneas de concentración de este parámetro. La distribución muestra que en la zona más próxima a la Sierra Madre se tienen valores de alcalinidad de hasta 100 mg/L, lo que indica que prácticamente no hay neutralización de la acidez del agua subterránea de esta zona (Drever, 1998). Por otro lado, en las áreas próximas a la línea costera, la entrada de agua de mar hacia el continente, puede causar un aumento de pH en el acuífero debido a que el agua marina tiene pH alcalino (Drever, 1998), este efecto se suma al aumento de la alcalinidad hacia la zona de costa, lo cual se refleja en la disminución de la acidez en los puntos de muestreo más alejados de la zona de recarga.

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

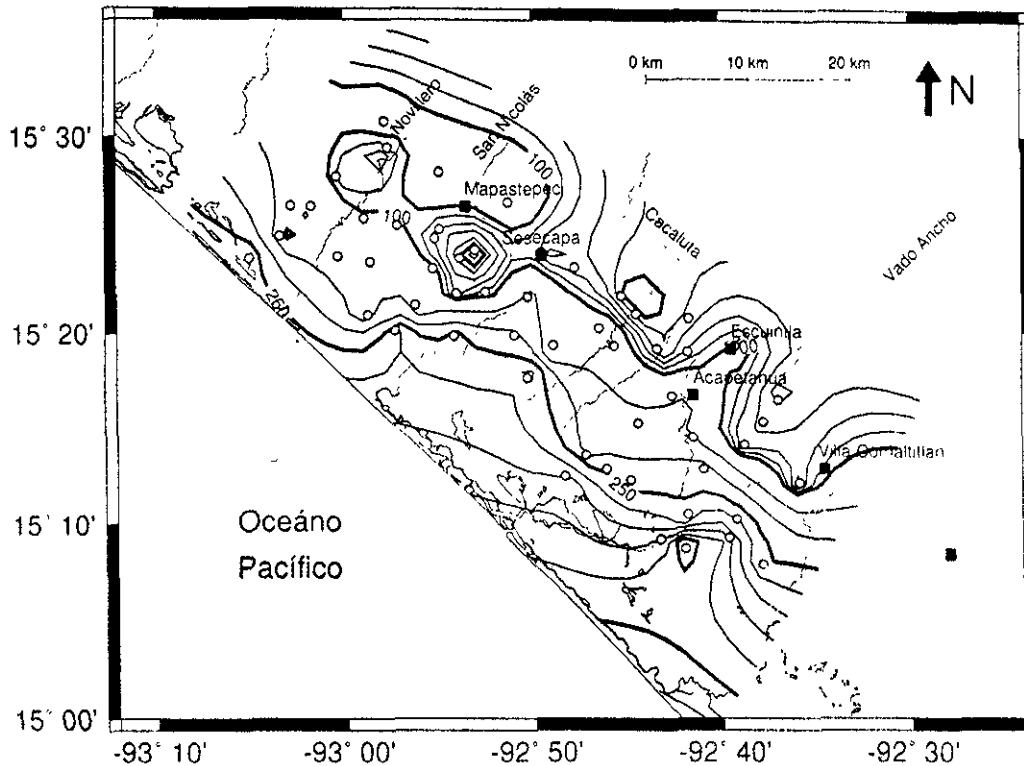


Figura 10. Líneas de isoconcentración de alcalinidad.

3.4 Análisis iónico

Los resultados obtenidos de los análisis químicos para los iones analizados en mg/L (miligramos por litro) y convertidos a meq/L (miliequivalentes por litro), se presentan en las tablas 2 y 3 respectivamente.

En la interpretación de los datos sólo se emplearon los datos de las muestras que tienen un porcentaje de error en el balance iónico menor al 5%. En la tabla 4 se muestran los resultados del balance iónico y se enmarcan aquellos cuyo valor es mayor al antes señalado. Se descartaron cinco muestras al efectuar

el estudio hidrogeoquímico del acuífero (muestras: 3 'Finca las Brisas', 9 'Rancho Nuevo', 18 'Rancho Santa Rosa', 39 'El Carpintero' y 54 'San Rafael').

En la elaboración de los mapas de isoconcentración de los principales iones analizados: Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ (Figuras 11 a 16), se emplearon las concentraciones en mg/L. Estos mapas de isoconcentración muestran que las tendencias de distribución se relacionan con la geometría del acuífero, ya que el aumento de la concentración para cada ion coincide espacialmente con la zona de crestas del basamento.

El incremento en la concentración del ion cloruro (Figura 11), en las proximidades de la costa, procede de la mezcla del agua del acuífero con agua marina (Custodio y Llamas, 1983), este incremento ocurre en mayor grado en la zona sureste del área de estudio, lo cual coincide con la zona de crestas del basamento. La zona correspondiente a la sección B-B' es la que presenta un mayor incremento en la concentración de cloruro y muestra una fuerte entrada de agua marina aproximadamente a 11 km a partir de la línea costera hacia el continente, mientras que la zona correspondiente a la sección A-A' es la que presenta un menor incremento en la concentración de este ion y muestra que la entrada de agua marina ocurre aproximadamente a 4 km a partir de la línea costera hacia tierra adentro.

Para el ion sulfato (Figura 12) también se considera que el incremento en su concentración provenga del agua marina (Custodio y Llamas, 1983). En este caso existe un punto en el cual la concentración de sulfato es mayor de 2000 mg/L, que corresponde a las proximidades de la muestra 6 'Salvación' y que se indica en la figura mediante una flecha; este valor de concentración puede deberse tanto a la presencia de agua de mar como a la disolución de yeso y anhidrita (Custodio y Llamas, 1983), que se encuentran presentes en el suelo de la zona (INEGI, 1993). La tabla 5 presenta valores para la relación SO_4/Ca , los

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

cuales sugieren la existencia de la disolución de los minerales antes mencionados.

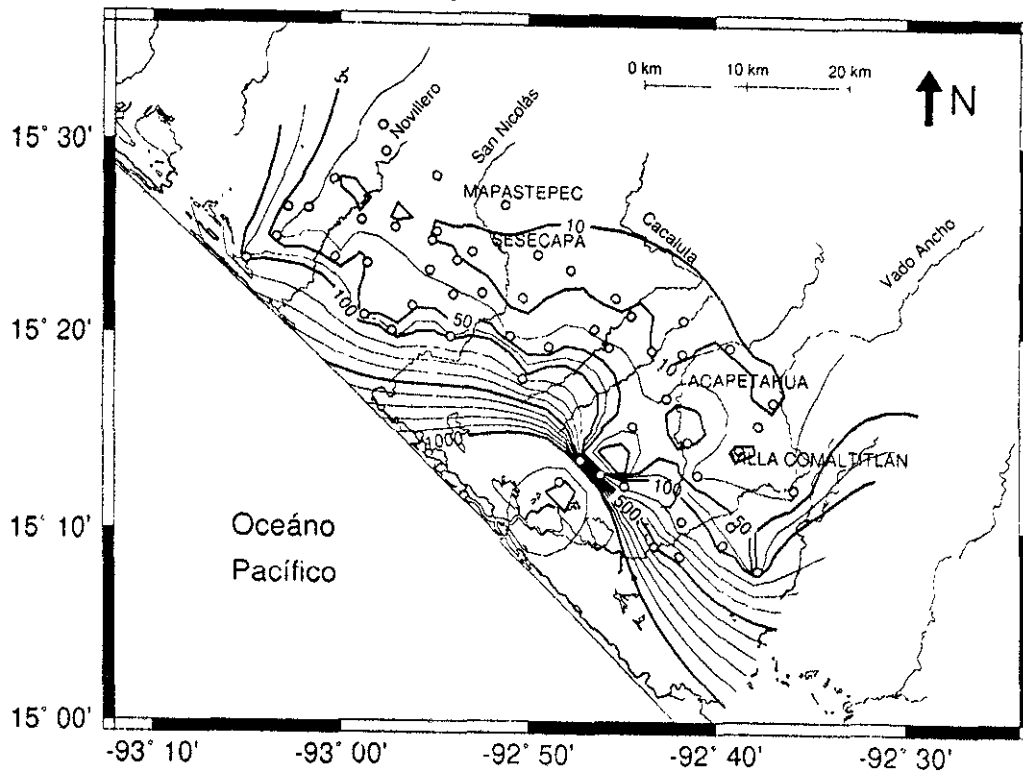


Figura 11. Isótopos de concentración del ion cloruro.

En las figuras 13, 14 y 15 se muestran las isótopos de concentración de los iones calcio, magnesio y sodio, respectivamente. En estas figuras se observa una similitud en la distribución de tendencias. Se observa un punto de mayor concentración de calcio (Figura 13) y magnesio (Figura 14) en la muestra 6 que confirma la mezcla de agua del acuífero con agua marina y la disolución de los minerales yeso y anhídrita (Custodio y Llamas, 1983). Para el caso del magnesio (Figura 14), el aumento en la concentración alrededor del punto de muestreo 6

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

además de deberse a la intrusión marina, también puede deberse al ataque de los silicatos magnésicos (Custodio y Llamas, 1983) que componen químicamente los suelos de la zona (INEGI, 1993).

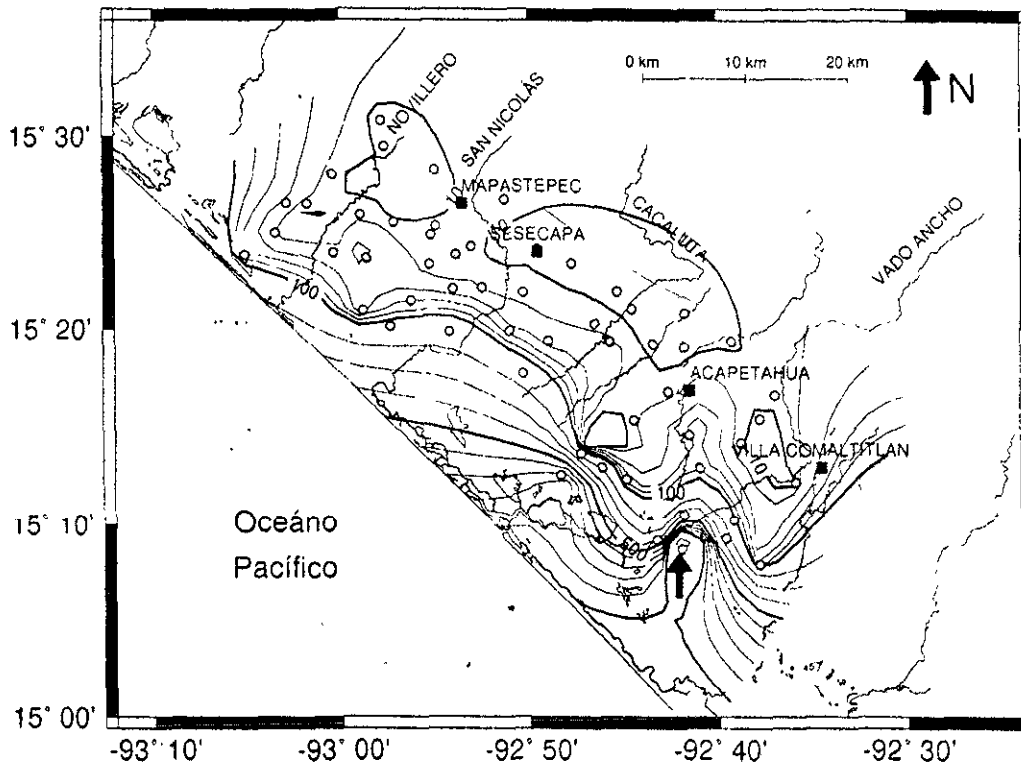


Figura 12. Isocóncntración de sulfato.
La flecha gris indica la posición espacial de la muestra 6.

Para el ion sodio (Figura 15) el aumento de la concentración puede ocurrir debido al ataque de feldspatos y otros silicatos sódicos (Custodio y Llamas, 1983) que se encuentran contenidos en los suelos de la zona de interés (INEGI, 1993).

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

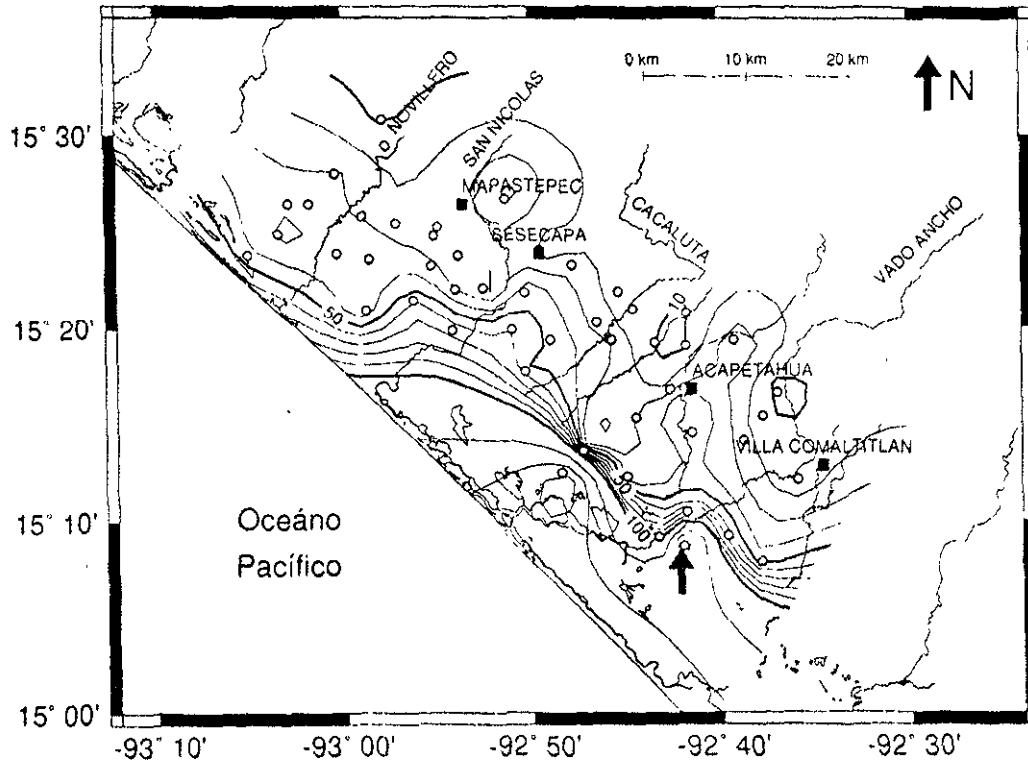


Figura 13. Isolíneas de concentración del ion calcio.

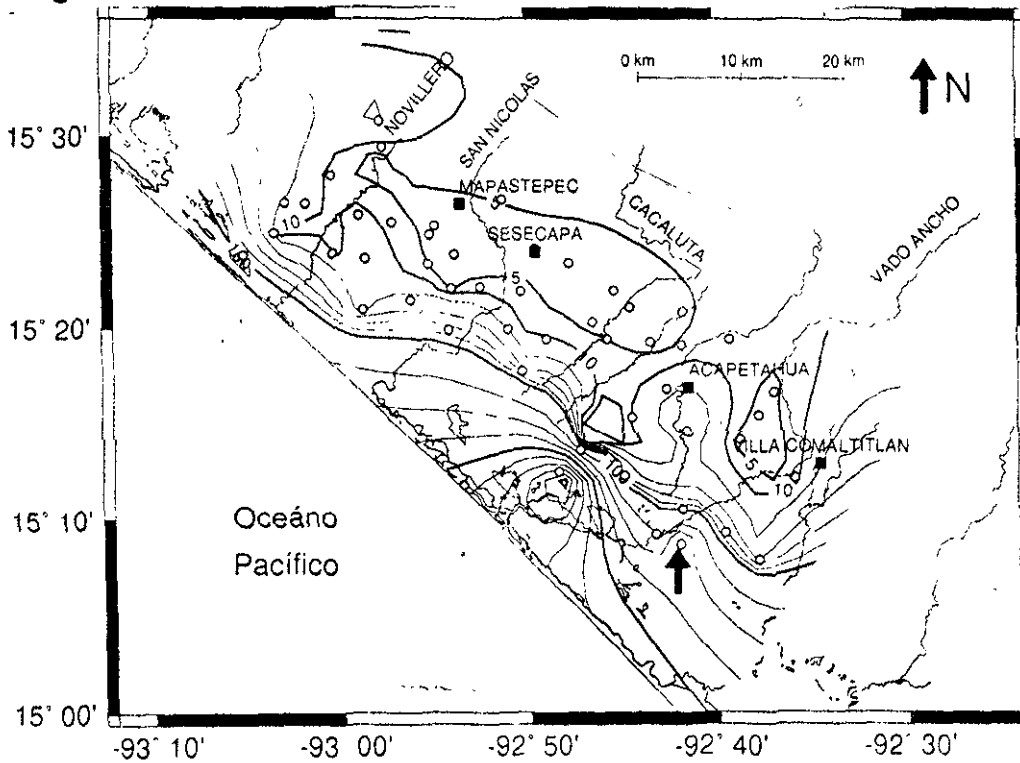


Figura 14. Isolíneas de concentración del ion magnesio.
La flecha gris indica la posición espacial de la muestra 6.

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

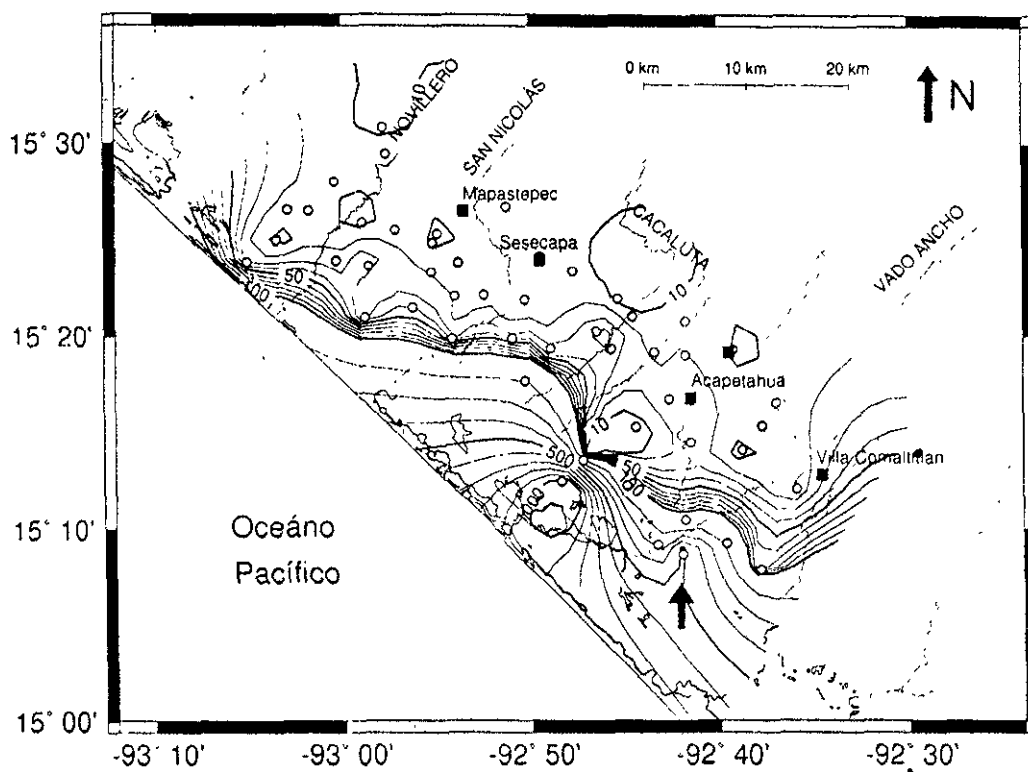


Figura 15. Isocóncntración de sodio.
La flecha gris indica la posición espacial de la muestra 6.

Para el ion potasio (Figura 16), se observa que en la zona suroeste del área de estudio hay una distribución en las concentraciones que difiere de las descritas para los otros iones. En este caso, el aumento de la concentración de potasio en la muestra 46 'Ibarra' puede deberse entre varias causas al ataque químico de micas y/o arcillas potásicas (Custodio y Llamas, 1983) presentes en la zona donde se localiza este punto de muestreo (zona III) (INEGI, 1993) o bien a la presencia de contaminantes agrícolas tales como fertilizantes o abonos (Custodio y Llamas, 1983).

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

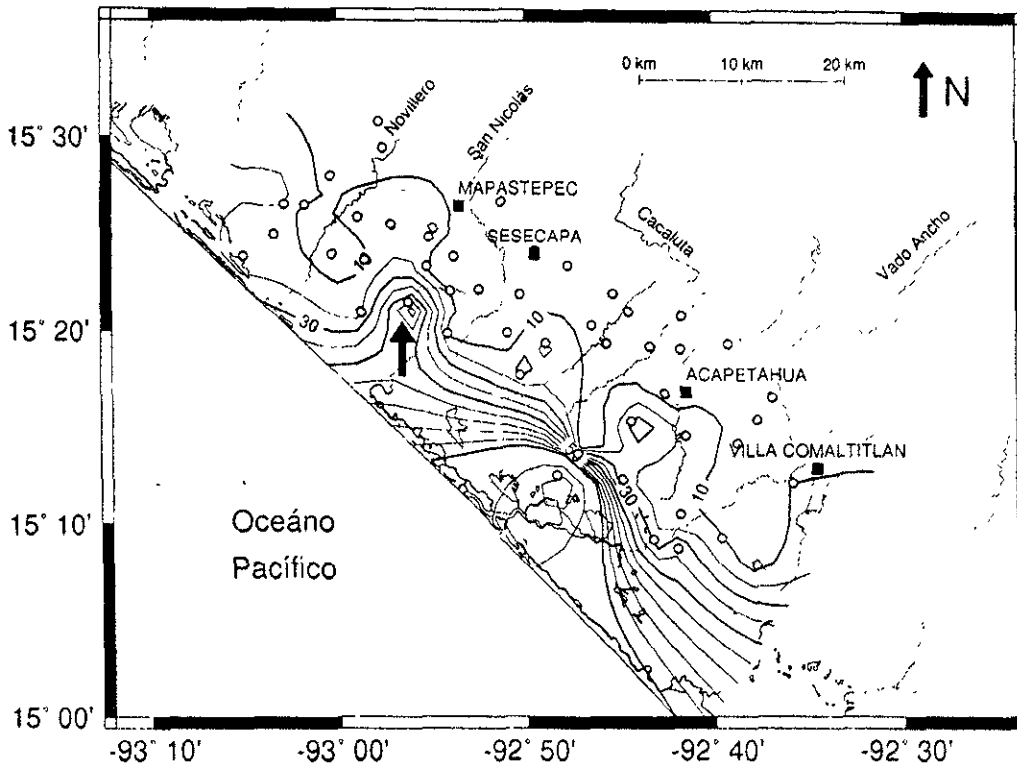


Figura 16. Isocóncas de concentración del ion potasio.
La flecha gris indica la posición espacial de la muestra 46.

3.5 Fases minerales

En la figura 17 se muestran gráficas del índice de saturación para algunas fases minerales presentes en el área de estudio. En esta figura se observa que existen tanto similitudes como diferencias en el comportamiento de las diferentes

fases minerales contenidas en los suelos de las zonas en las que fue dividida el área de interés, esto influye en la composición y comportamiento geoquímico que tiene el acuífero en cada una de estas zonas y que ya se ha explicado en los temas anteriores.

En la figura 17 se presentan algunos de los resultados obtenidos en el programa de cálculos geoquímicos.

En el cuadro 3 se presentan de forma resumida los resultados obtenidos en el programa para cálculos geoquímicos PHREEQC, estos resultados también permiten observar las similitudes y diferencias existentes en cada zona con respecto a las fases minerales de los suelos que las componen.

Tanto en la figura 17 como en el cuadro 3 es posible observar que la división por zonas propuesta para el área de estudio, basada en la distribución de los suelos, fue adecuada, ya que se obtuvieron tanto similitudes como diferencias en los índices de saturación para las fases minerales presentes en cada zona.

Se observa que las zonas II y III muestran una mayor similitud en sus índices de saturación, sin embargo para algunas fases minerales (por ejemplo montmorillonita cálcica) las tres zonas son completamente diferentes, y para otras fases las similitudes se observan entre las zonas I y III (caso de la melanterita) o entre las zonas I y II (para los minerales gipsita y yeso), lo cual confirma la hipótesis de que los suelos tienen una marcada influencia sobre las aguas del acuífero estudiado (La química de los suelos se discutió en la sección 1.4 Suelos).

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

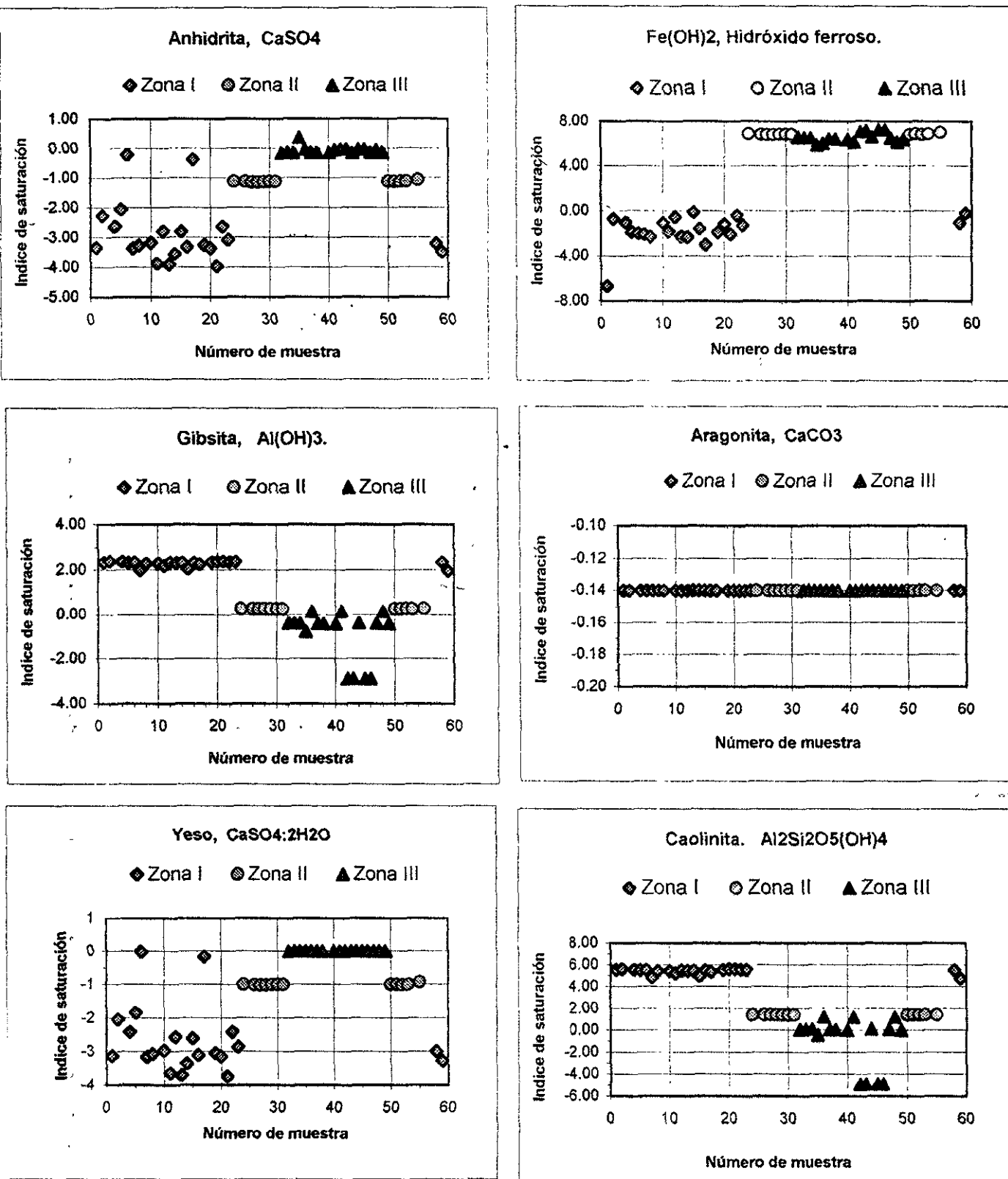


Figura 17. Índices de saturación de algunas fases minerales presentes en el área de estudio.

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

Cuadro 3. Resultados obtenidos en el programa PHREEQC.

FASE MINERAL	FÓRMULA	ZONA I	ZONA II	ZONA III
Albita	NaAlSi ₃ O ₈	Equilibrio	Equilibrio	Equilibrio
Alunita	KAl ₃ (SO ₄) ₂ (OH) ₆	Subsaturación	Subsaturación	Subsaturación
Amoniaco	NH ₃	Subsaturación	Subsaturación	Subsaturación
Anhidrita (Figura 17)	CaSO ₄	Subsaturación	Subsaturación	Subsaturación
Anortita	CaAl ₂ Si ₂ O ₈	Equilibrio (7 y 17 subsaturadas)	Equilibrio	Equilibrio
Aragonita (Figura 17)	CaCO ₃	Subsaturación	Subsaturación	Subsaturación
Bióxido de Carbono	CO ₂	Subsaturación	Subsaturación	Subsaturación
Calcita	CaCO ₃	Equilibrio	Equilibrio	Equilibrio
Caolinita (Figura 17)	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Sobresaturación	Sobresaturación	Sobresaturación
Clorita	Mg ₅ Al ₂ Si ₃ O ₁₀ (OH) ₈	Sobresaturación	Sobresaturación	Sobresaturación (35, subsaturada)
Crisotilo	Mg ₃ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Subsaturación	Sobresaturación	Sobresaturación
Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	Equilibrio (11, 15: subsat.)	Equilibrio	Equilibrio (35 subsaturada)
Gibbsite (Figura 17)	Al(OH) ₃	Sobresaturación	Sobresaturación	Subsaturación (36,41,48:sobresat.)
Goetita	FeOOH	Sobresaturación (1, subsaturada)	Sobresaturación	Sobresaturación
Hematita	Fe ₂ O ₃	Sobresaturación	Sobresaturación	Sobresaturación
Hidrógeno	H ₂	Subsaturación	Subsaturación	Subsaturación
Hidróxido de Aluminio	Al(OH) ₃	Subsaturación	Subsaturación	Subsaturación
Hidróxido Ferroso (Figura 17)	Fe(OH) ₂	Subsaturación	Sobresaturación	Sobresaturación

Las muestras indicadas entre paréntesis corresponden a las excepciones encontradas en cada zona del área de estudio.

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

Cuadro 3. Resultados obtenidos en el programa PHREEQC, Continuación.

FASE MINERAL	FÓRMULA	ZONA I	ZONA II	ZONA III
Illita	$K_{0.6}Mg_{0.25}Al_{2.3}Si_{3.5}O_{10}(OH)_2$	Subsaturación	Subsaturación	Subsaturación
Jarosita Potásica	$KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$	Subsaturación	Equilibrio	Equilibrio
Melanterita	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	Subsaturación	Sobresaturación	Subsaturación
Montmorillonita Cálcica	$Ca_{0.165}Al_{2.33}Si_{3.67}O_{10}(OH)_2$	Sobresaturación	Equilibrio	Subsaturación
Moscovita (Mica Potásica)	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$	Equilibrio	Equilibrio	Equilibrio
Nitrógeno	N_2	Subsaturación (2,6,10,12,15,17 sobres.)	Subsaturación	Subsaturación
Ortoclasa (Feldes_ pato Potásico)	$KAlSi_3O_8$	Subsaturación	Subsaturación	Subsaturación
Oxígeno	O_2	Subsaturación	Subsaturación	Subsaturación
Pirita	FeS_2	Equilibrio	Equilibrio	Equilibrio
Sepiolita	$Mg_2Si_3O_{7.5}OH \cdot 3H_2O$	Subsaturación	Sobresaturación	Sobresaturación
Siderita	$FeCO_3$	Sobresaturación (1, subsaturada)	Sobresaturación	Sobresaturación
Sulfuro	FeS	Subsaturación	Sobresaturación	Sobresaturación
Yeso (Figura 17)	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	Subsaturación	Subsaturación	Equilibrio

Las muestras indicadas entre paréntesis corresponden a las excepciones encontradas en cada zona del área de estudio.

Adicionalmente estos resultados sugieren que el aumento de la concentración del ion sulfato en el área de estudio y particularmente en el punto 6 'Salvación' se debe a la disolución de anhidrita y a la presencia de agua de mar, pero no recibe influencia de la disolución de yeso. Del mismo modo, la subsaturación de anhidrita en las tres zonas contribuye al aumento de concentración de los cationes calcio y magnesio. Para el caso del magnesio este aumento de concentración también recibe influencia del ataque químico de silicatos magnésicos.

Estos resultados descartan la posibilidad (como se mencionó en la discusión de la concentración del ion sodio en esta misma sección) de que el aumento en la concentración del ion sodio se deba en parte al ataque de silicatos sódicos, por lo que este aumento de concentración se atribuye únicamente a la presencia de agua marina.

Para el ion potasio, se establece que el aumento en la concentración, incluyendo el punto 46 'Ibarra', se debe al ataque químico de la Illita y la ortoclasa (como se mencionó en la discusión de la concentración de este ion en esta misma sección), y aun cuando no se estableció el tipo o tipos de contaminantes agrícolas en el área de estudio se considera que estos tienen una elevada influencia en el aumento de la concentración de este catión.

3.6 Concentración de nitratos (NO_3^-)

Las concentraciones del ion nitrato en mg/L (miligramos por litro) y convertidos a meq/L (miliequivalentes por litro), se presentan en las tablas 2 y 3 respectivamente. En el área de estudio se encontraron valores de concentración en un rango de una mg/L a 243 mg/L. Tres de los pozos muestreados presentan concentraciones de nitratos que sobrepasan la concentración límite recomendada por las normas internacionales para agua de consumo humano, la cual es de 45 mg/L (Faure, 1998) (Melian y otros, 1999). Estos pozos y sus concentraciones cuantificadas son: 26 'Rancho Quemado', 118 mg/L; 38 'Rancho Las Margaritas', 84 mg/L y 47 'Rancho la Luz', 243 mg/L. La figura 18 presenta las líneas de igual concentración de nitratos para el acuífero. En esta figura se observa que en la zona de estudio existe contaminación puntual por nitratos.

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

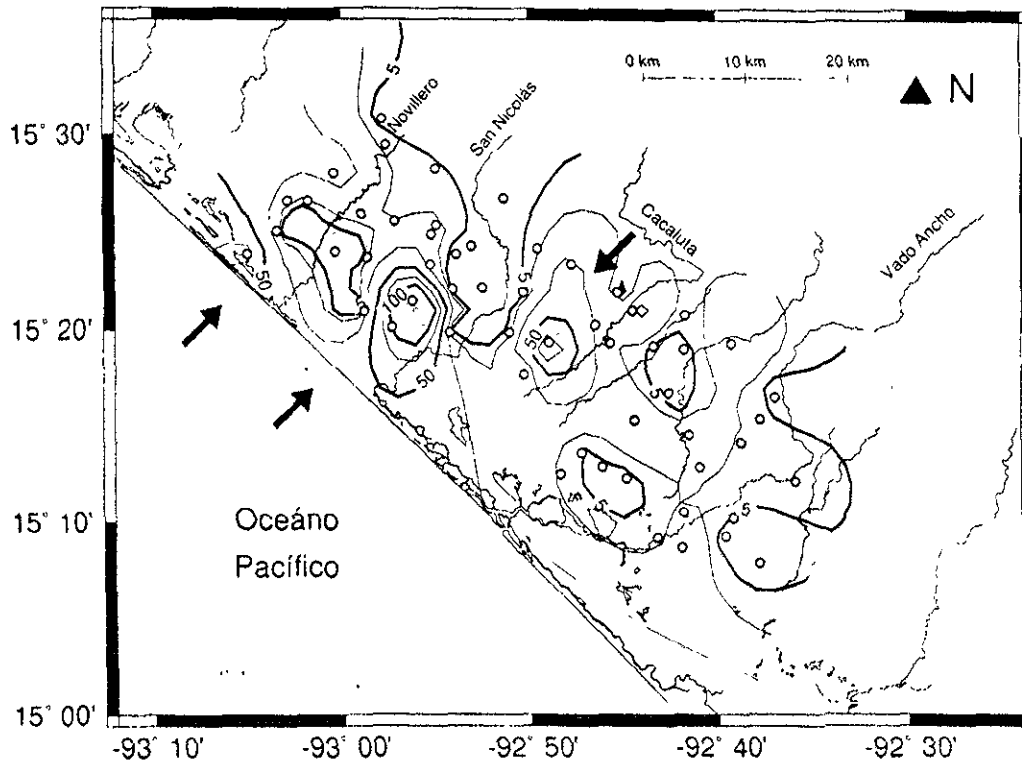


Figura 18. Isocóncntración de concentración del ion nitrato.

Las flechas indican las zonas de contaminación puntual.

Ver texto para explicación.

El nitrógeno en forma de nitrato y nitrito puede estar presente de forma natural en las aguas subterráneas y superficiales. La concentración de nitratos en aguas subterráneas por lo general se encuentra en el rango 1 - 10 mg/L (Burges, 1999). En el área de estudio se tiene un valor de fondo de aproximadamente 5 mg/L, sin embargo, una cantidad importante de las muestras analizadas (25%) muestran concentraciones mayores a 10 mg/L, lo cual indica la presencia de contaminación.

En el acuífero de Acapetahua, los valores que sobrepasan el límite recomendado de nitratos para agua de consumo humano (45 mg/L) son excesivamente altos (1.9, 2.6 y 5.4 veces) y pueden ocasionar problemas de

salud en la población de las localidades involucradas, ya que el exceso de nitrógeno en agua superficial y subterránea que es usada como agua para beber, es peligroso para ciertos grupos de personas y animales. En infantes, particularmente en aquellos menores de seis meses de edad, puede ocurrir envenenamiento por nitrato, ya que su sistema gástrico no tiene la acidez suficiente que evita el desarrollo de ciertas bacterias que convierten el nitrato en nitrito, el cual oxida la hemoglobina a metamoglobina, impidiendo el transporte de oxígeno. Esta condición se conoce como metamoglobinemia, cianosis o síndrome del niño azul, que ocasiona daño cerebral o muerte por sofocación (Burges, 1999; DNR-FSIC., 1999; Pacheco y Cabrera, 1997). La salud humana de niños mayores de seis meses y de adultos puede ser afectada por la aparición de cáncer ocasionado por el consumo de agua contaminada con nitratos (Pacheco y Cabrera, 1997). Las vacas preñadas también sufren de metamoglobinemia, lo que provoca la muerte de los becerros recién nacidos (Burges, 1999; DNR-FSIC., 1999).

El origen del ion nitrato en aguas subterráneas puede darse por descomposición de materia orgánica (desechos humanos y/o animales) o por la presencia de ^{compuestos} elementos químicos de uso agrícola o industrial (Rogers, 1999; Pacheco y Cabrera, 1997). Generalmente el incremento en la concentración de nitratos se debe al empleo de fertilizantes, sin embargo en la zona se observó que otra de las actividades económicas más importante es la ganadería, lo cual implica un aporte importante de este ion a través del abono o estiércol procedente de esta actividad.

En el presente estudio no se determinó el origen del ion nitrato debido a que no se contó con el equipo necesario para realizar análisis de isótopos estables de nitrógeno. Sin embargo es probable que el origen de este ion en la zona sea la suma de las diversas actividades económicas que se practican.

3.7 Concentración de nitritos (NO_2^-)

En las tablas 2 y 3, se presentan las concentraciones cuantificadas para el ion nitrito en mg/L y convertidos a meq/L, respectivamente. La concentración de nitritos en mg/L encontrada en el área de estudio, varía entre no detectado (nd) y nueve. En la figura 19 se observa que el valor de fondo de la concentración de nitrito es de dos mg/L. En la parte sureste del área de estudio donde se encuentran los puntos con concentraciones mayores y específicamente en el punto de muestreo 17 'Río Florido' que tiene la mayor concentración de este ion (9.10 mg/L), se encuentra una zona de lagunas, esteros y pantanos, rica en materia orgánica en estado de descomposición, esta zona se señala en la figura 19.

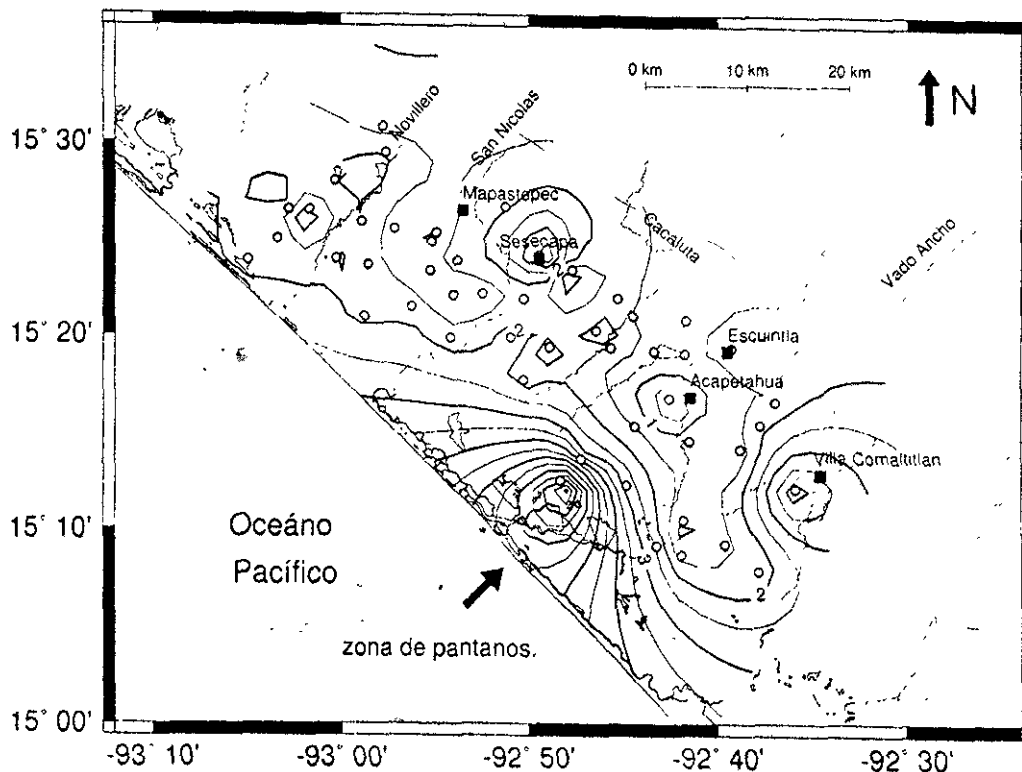


Figura 19. Isolíneas de concentración del ion nitrito.

Los estándares de la Unión Europea (UE) y de la Organización Mundial de la Salud (OMS), adoptados en 1982, recomiendan que la concentración del ion nitrito en agua para consumo humano debe encontrarse dentro del rango 0.1–3.0 mg/L (Melian y otros, 1999). En el caso del acuífero estudiado, se tiene que cinco muestras (9.1%) no se encuentran dentro de este rango. Las muestras que exceden la recomendación de la OMS y la UE son: 10 'Rancho Josué', 4.50 mg/L; 16 'Los Claveles', 3.30 mg/L; 17 'Río Florido', 9.10 mg/L; 29 'Sesecapa', 4.90mg/L y 60 'Río Vado Ancho', 4.12 mg/L.

La zona en la cual se localizan las mayores concentraciones de nitritos (zona I) contiene pirita y materia orgánica. Los resultados de la modelación hidrogeoquímica indican que las muestras 6 'Salvación' y 17 'Río Florido', entre otras (2, 10, 12 y 15), se encuentran sobresaturadas con N_2 (Cuadro 3), mientras que las demás muestras se encuentran subsaturadas con el mismo elemento. No fue posible comprobar químicamente si en las concentraciones del ion sulfato está considerado (sumado) el posible aporte de este ion producido por la oxidación de la pirita al reducirse el nitrato a nitrito. Adicionalmente los resultados de la modelación hidrogeoquímica indican que todas las muestras del área de estudio se encuentran subsaturadas con O_2 (Cuadro 3), lo cual es un indicador de que la descomposición de la materia orgánica produce un consumo importante del oxígeno disuelto, ocasionando la formación de un medio reductor en el que se favorecen las condiciones de estabilidad para la formación y permanencia del ion nitrito el cual es un intermediario en el proceso de la desnitrificación. Otro indicador de que en la zona existe un medio reductor es el hecho de que la fase mineral siderita ($FeCO_3$) sobresatura las aguas de la zona I (Cuadro 3), concentraciones elevadas de Fe^{+2} se observan en zonas reductoras (Cuadro 3) (Postma y otros, 1991). A pesar de que las isolíneas de la figura 19, no muestran relación entre la distribución de tendencias en las concentraciones de nitritos con

la distribución de las concentraciones de nitratos (Figura 18), se puede suponer que la presencia de nitritos se debe al proceso de reducción de nitratos.

La desnitrificación es un proceso natural que disminuye la contaminación por nitratos en aguas subterráneas. Los organismos de la desnitrificación han sido observados en el subsuelo, en la zona vadosa y en acuíferos. Un factor crítico que controla la desnitrificación en el subsuelo es la presencia de carbono orgánico. En los procesos de desnitrificación en suelos ocurre la producción de compuestos gaseosos nitrogenados (Richards y Webster, 1999)

En la práctica el ion nitrato puede removerse *in situ* de las aguas subterráneas por reducción a N_2 , durante la reacción de reducción se producen NO_2^- , NO y N_2O como intermediarios. En acuíferos que contienen las fases minerales pirita, silicatos de $Fe(II)$ y/o materia orgánica (como donadores de electrones), se favorece termodinámicamente la reducción del nitrato (Postma y otros, 1991). Las zonas reductoras se caracterizan por tener concentraciones elevadas de Fe^{+2} (de 0.05 a 0.25 mM). Cuando no es posible observar la presencia de nitritos o amoníaco se sugiere que el N_2 es el producto dominante de la reacción. Cuando ocurre la reducción de nitrato con oxidación de pirita, estequiométricamente se produce ion sulfato. Estudios demuestran que la reducción de nitrato por oxidación de materia orgánica es importante en acuíferos. (Postma y otros, 1991).

En general las grandes cantidades de nitrógeno se asocian con una gran cantidad de compuestos orgánicos solubles en agua y elementos tales como azufre y fósforo que estimulan la actividad microbiana para la degradación de restos vegetales y animales en los suelos (McSweeney y Grunwald, 1999).

La presencia de nitritos en las aguas muestreadas puede deberse a la existencia de una cantidad importante de materia orgánica en los suelos del área

de estudio. La descomposición de esta materia orgánica produce un consumo importante del oxígeno disuelto, lo cual a su vez puede producir un medio reductor que permite la reducción de nitratos a nitritos (McSweeney y Grunwald, 1999).

3.8 Familias de agua

Se generaron diagramas de Piper para cada una de las tres zonas en las que se dividió el área estudiada y un diagrama de Piper global (Figura 20). En la figura 21, se presenta la distribución espacial de las familias de agua encontradas mediante el uso de diagramas de Piper.

De acuerdo a la composición cationica, se establece que el 48.3% de las aguas son cálcicas, el 31.7% son sódicas, el 20.0% son magnésicas. Con base en los aniones, el 93.3% de las aguas son bicarbonatadas, el 5% son cloruradas y el 1.7% son sulfatadas. El 5.0% de las muestras corresponden a la familia de las aguas cloruradas-magnésicas, el 1.7% corresponden a las sulfatadas-magnésicas, el 13.3% pertenecen a la familia bicarbonatada-magnésica, el 48.3% se encuentra dentro de la familia bicarbonatada-cálcica y el 31.7% de las muestras caen dentro de la familia bicarbonatada-sódica.

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

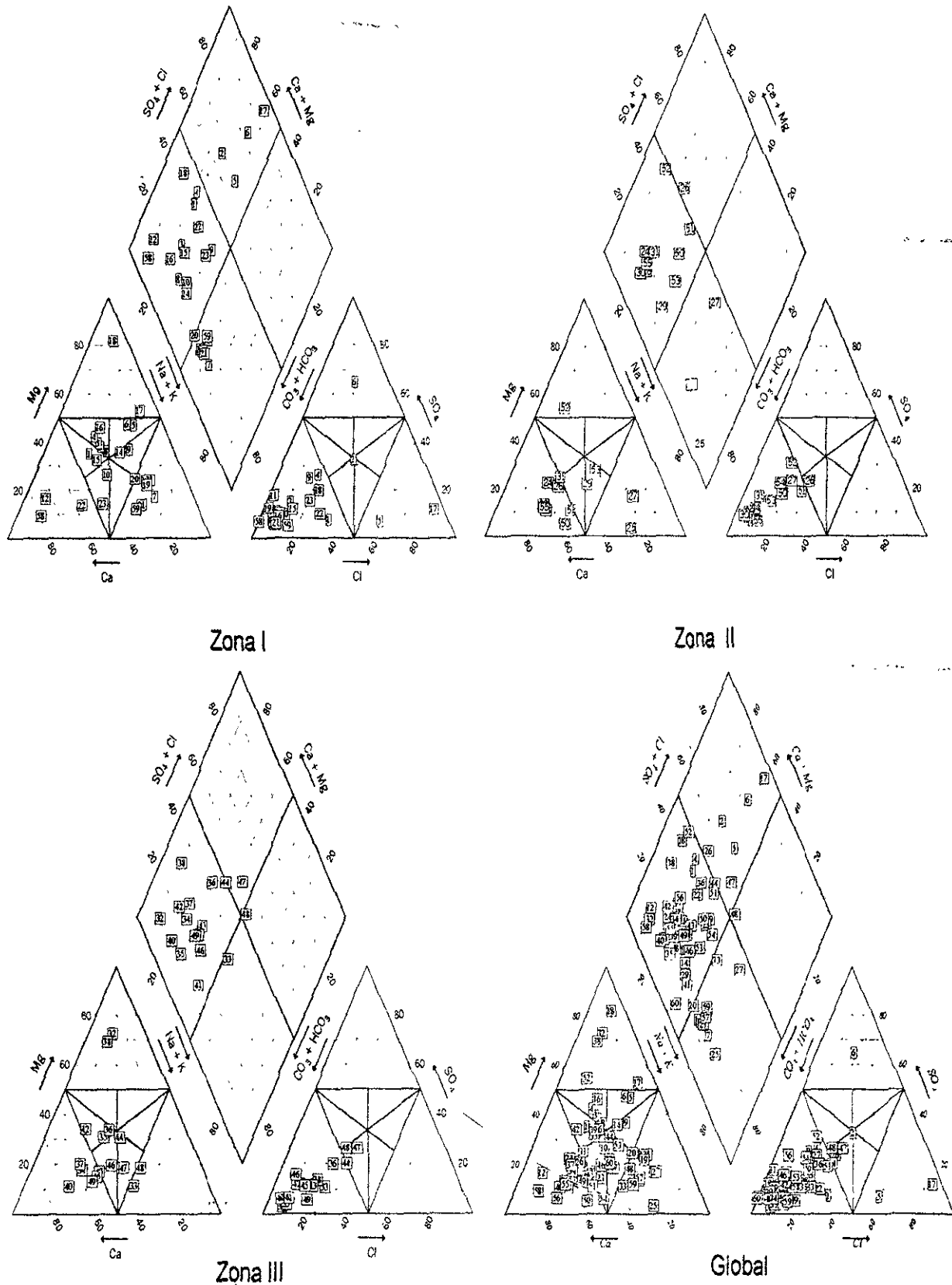


Figura 20. Diagramas de Piper para las tres zonas y para el área de estudio (global).

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

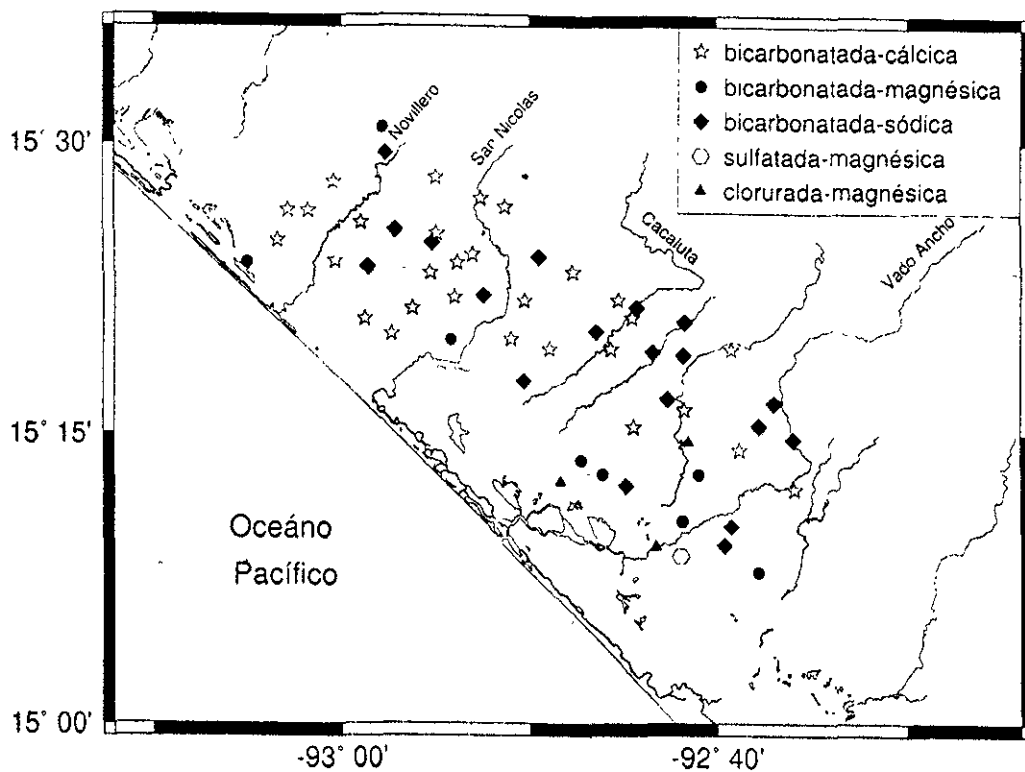


Figura 21. Distribución espacial de las familias de agua.

En la distribución espacial de las familias de agua (Figura 21), se observa que esta distribución no es homogénea para cada una de las zonas en las que se dividió el área de estudio, sin embargo, cada zona se caracteriza por la ocurrencia mayoritaria de una familia de agua. Se tiene que a) para la zona I: 50.0% de las muestras pertenecen a la familia bicarbonatada-sódica, 31.8% muestras son de la familia bicarbonatada-cálcica, 13.6% son de la familia clorurada-magnésica y el 4.5% restante (muestra 6 'Salvación') es de la familia sulfatada-magnésica. b) en la zona II: el 66.6% de las muestras son de la familia bicarbonatada-cálcica, 26.6% son de la bicarbonatada-sódica y el 6.7% pertenecen a la bicarbonatada-magnésica. c) zona III: el 66.7% de las muestras son de la familia bicarbonatada-

cálcica, 22.2% son de la bicarbonatada-sódica y el 11.1% pertenecen a la bicarbonatada-magnésica.

En la figura 21, se corrobora que la división por zonas propuesta para el área de estudio con base a la distribución de los suelos permite observar que las aguas de las zonas II y III comparten características químicas que se reflejan en una distribución similar de familias de agua, mientras que la zona I muestra características químicas diferentes, que se reflejan en una distribución de familias de agua diferente a las otras zonas del área de estudio. Cabe hacer notar que en este caso también, aunque en menor grado, las tres zonas contienen el mismo tipo de familia de agua y solo la zona I tiene familias de agua que no se encuentran en las demás zonas del área de estudio.

3.9 Interfase agua dulce-agua salobre

Los valores de conductividad eléctrica medidos en campo se muestran en la tabla 1. El rango de valores se encuentra entre 75 y 15930 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los cuales corresponden a las muestras 57 'Río Cacaluta' y 17 'Río Florido' respectivamente. Tres muestras de las 55 consideradas para el análisis (5.45%) presentan valores de conductividad mayores a 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En la figura 22 se muestran las isolíneas de conductividad eléctrica para el área de estudio. Se observa que estos valores se incrementan con la cercanía a la costa y que en la parte sureste del área de estudio existe una entrada

importante de agua de mar, la cual esta indicada por los valores de conductividad eléctrica mayores a $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Las isolíneas muestran que las tendencias de distribución que se observan, guardan relación con la geometría del acuífero, ya que las crestas del basamento funcionan como barreras físicas entre el acuífero y el mar (Steinich y Sánchez, 1998). Considerando las secciones A-A' y B-B' de la figura 3 empleadas en la caracterización de la geometría del acuífero, se observa que las líneas de conductividad eléctrica mayores de $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$ coinciden espacialmente con el área entre las crestas del basamento (Figura 4) y la línea costera, esta área se localiza aproximadamente a cuatro y 11 km a partir de la línea de costa hacia el continente en los puntos que corresponden a las secciones A-A' y B-B' respectivamente.

La posición de la interfase agua dulce- agua salobre, se visualiza en el mapa de la figura 23, en el que se dibujaron las líneas de isoconcentración de STD en mg/L.

Considerando la clasificación de las aguas en base a su concentración de STD (Tabla 6) hecha por Davis y DeWiest (1966) y por Freeze y Cherry (1979), en el área de estudio, se observa que el frente de intrusión no se produce en forma paralela a la línea de costa.

La presencia de la intrusión se establece como se vio en la sección 3.2 análisis iónico, con base en los datos de concentración obtenidos para los diferentes iones analizados, especialmente las concentraciones de los iones cloruro, sulfato, calcio, magnesio y sodio.

Los STD tienen un fuerte incremento entre 500 y 1000 mg/L, marcando una zona de interfase o de transición entre el agua dulce y el agua salobre (Steinich y otros , 1999).

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

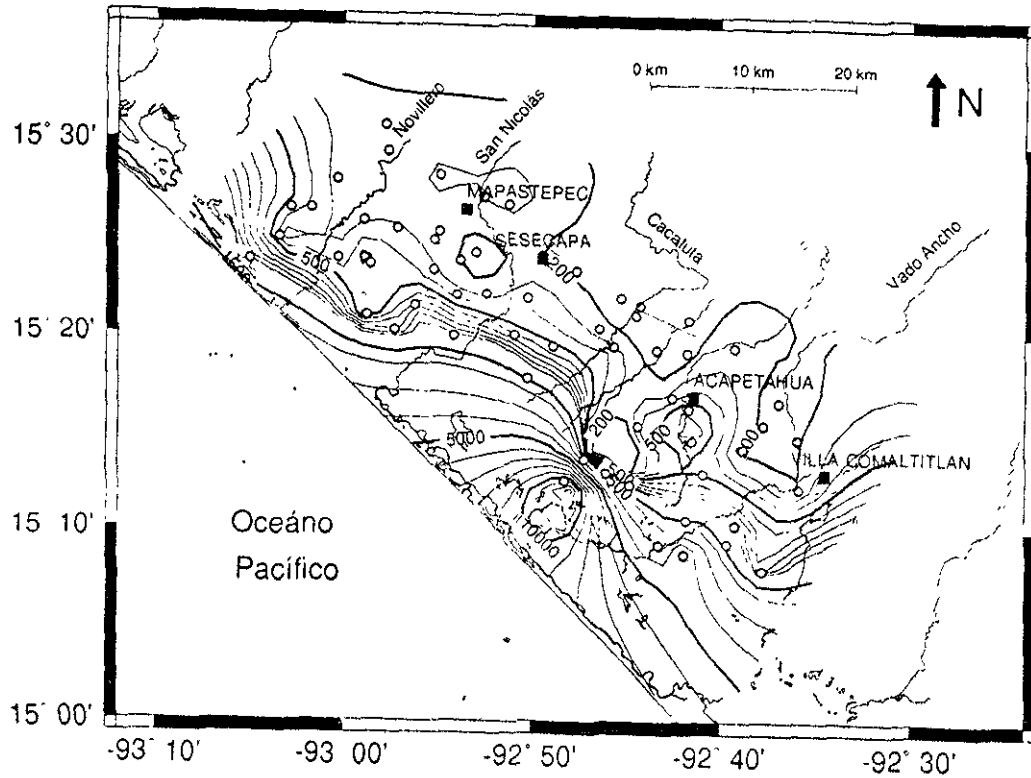


Figura 22. Isolíneas de conductividad eléctrica.

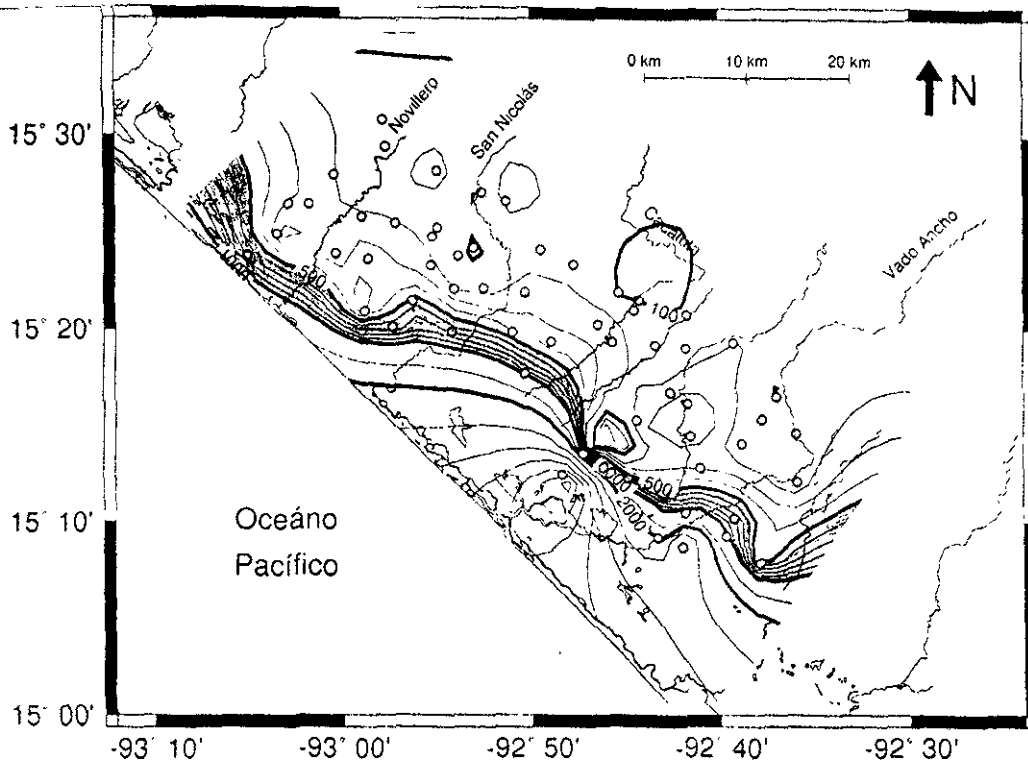


Figura 23. Isolíneas de concentración de sólidos totales disueltos en mg/L.

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

De acuerdo con Steinich y otros (1999), las lagunas saladas cerca de la costa son una manifestación en superficie de la zona de transición y a su vez, esta zona de interfase coincide espacialmente con la zona de crestas del basamento cercanas a la región de la costa.

La distancia entre la línea de costa y la interfase es de menos de 5 km en la parte noroeste del área de estudio y de más de 15 km en la parte sureste del acuífero.

CONCLUSIONES

La división por zonas propuesta para el área de estudio, basada en la distribución de los suelos, fue adecuada, lo cual se refleja en los resultados.

Las características particulares de los suelos que sobreyacen al acuífero libre de Acapetahua, Chiapas, influyen sobre algunos parámetros fisicoquímicos y químicos que se miden en la parte somera de estas aguas subterráneas.

El incremento de la temperatura del agua del acuífero favorece la disolución de sustancias ácidas contenidas en los suelos, ocasionando una disminución de los valores de pH del agua, esto particularmente es notorio cerca de la zona de recarga en donde predominan los suelos ácidos.

Las tendencias de distribución que se observan en las isolíneas de concentración para los diferentes iones analizados en el estudio se deben principalmente a la geometría del acuífero. Estas tendencias de distribución también reciben influencia de la composición química de los suelos, específicamente por la disolución y ataque a minerales.

En el área estudiada se encuentran puntos (muestras 26, 38 y 47) que tienen una severa contaminación por nitratos, cuyo origen puede ser diverso y puede llegar a ser un grave problema de salud debido a que esta agua se emplea en todas las actividades de la población.

El análisis de las muestras indica que existen 5 familias de agua: 1) cloruradas-magnésicas, 2) sulfatadas-magnésicas, 3) bicarbonatadas-magnésicas, 4) bicarbonatadas-cálcicas y 5) bicarbonatadas-sódicas, de las cuales la familia clorurada-magnésica es la más abundante, con un 55% del total.

La elaboración de diagramas de Piper, así como los resultados obtenidos de la modelación hidrogeoquímica, permitieron establecer que no existe una distribución homogénea por zonas de las aguas muestreadas, sin embargo, cada zona se caracteriza por la ocurrencia mayoritaria de una familia de agua.

El frente de intrusión no se produce en forma paralela a la línea de costa, la zona de transición esta bien delimitada y guarda relación con las crestas del basamento, determinadas por la geometría del acuífero.

REFERENCIAS

- Aguilera, H. N., 1989. Tratado de Edafología de México, Tomo I. 1ª Ed. Facultad de Ciencias, U.N.A.M. México, D. F., 222 p.
- Anónimo. 1995. User's Guide to PHREEQC. United States Geological Survey(U.S.G.S.). L.C., U. S. A., 143 p.
www.brr.cr.usgs.gov/projects/GWC_coupled/phreeqc/html/phqc_6.htm
- Atkins, P. W., 1986. Fisicoquímica. 1ª ed. en español. Fondo Educativo Interamericano, S. A. , México, D. F. 969 p.
- Burges, Richard. 1999. Nitrates in Groundwater and Surface Water. The Alachua Country Environmental Protection Department. (ACEPD).
<http://ns2.co.alachua.fl.us/acepd/script/nitrates.htm>.
- CNA. 1997. Mapa: Condiciones Geohidrológicas de los Principales Acuíferos de la República Mexicana. C N A (Comisión Nacional del Agua).
1ª impresión. México, D. F.
- Custodio, Emilio y M. R. Llamas. 1983. Hidrología Subterránea, Tomo 1. 2da Ed. Omega, S. A. Barcelona, España. 1157 p.
- Davis S. N.; DeWiest R. J. H. 1966. Hydrogeology. John Willey. N. Y., U.S.A. (1971. Hidrogeología. Ediciones Ariel. España) . 463 p.
- DNR-FSIC., 1999. Excess Nitrogen in Drinking Water is Detrimental to Children and Livestock. Forest Service Information Center. Marylan.
www.dnr.state.md.us/forests/Publications/exnit.html.

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

Drever, J. I., 1998, The Geochemistry of Natural Waters. 2nd Ed. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., U.S.A., 437 p.

Faure, Gunter., 1998, Principles and applications of geochemistry. 2nd Ed. Prentice-Hall, Inc., N. J., U.S.A., 600 p.

FitzPatrick, E. A., 1984, Suelos, su Formación, Clasificación y Distribución. 1^{ra} Ed. C.E.C.S.A., México D. F., 430 p.

Freeze, A. and J. A. Cherry, 1979. Ground Water. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., U.S.A., 604 p.

INEGI. 1994, Cartas Topográficas Hojas D15A29, D15A39, D15B21, D15B31, D15B41, D15A31 y D15B42, 1:50 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. 2^{da} impresión, Aguascalientes, Ags., México.

INEGI. 1993, Carta Edafológica, Hoja Huixtla D15-2, 1:250 000. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática) . 3^{ra} impresión, Aguascalientes, Ags., México.

Juárez, Faustino. L.U.G.I.S., Laboratorio Universitario de Geoquímica Isotópica. U. N. A. M. , Universidad Nacional Autónoma de México. Comunicación personal.

Melian, R., Myrlian, N., Gouriev, A. 1999. Groundwater Quality and Rural Drinking-Water Supplies in the Republic of Moldova. Hydrogeology Journal. 7. p. 188-196.

McSweeney, Kevin. Grunwald, Sabine. 1999. Department of Soil Science. University of Wisconsin, Madison. Soil Organic Matter. www.soils.wisc.edu/courses/SS325/organic.htm.

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

- Morales, L. R., 1998. Estudio Geohidrológico del Valle de Montealegre, Ajusco, México. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México, 82 p.
- Morán Z., D. J. 1985. Geología de la República Mexicana. 2^{da} Ed. INEGI - UNAM, Facultad de Ingeniería. 88 p.
- Müllerried, F. K. G., 1957. Geología de Chiapas. 1^{ra} Ed. Cultura, T. G., Gobierno Constitucional del Estado de Chiapas., México. 180 p.
- NCIBRD, 1995. Quality Assurance Project Plan. National Center for Integrated Bioremediation Research and Development (NCIBRD). Michigan, U.S.A., 68 p.
- Pacheco, A. J., Cabrera, S. A. 1997. Groundwater Contamination by Nitrates in The Yucatan peninsula, México. Hydrogeology Journal, V.5, no.2, p. 47-53.
- Postma, D., Boesen, C., Kristiansen, H., Larsen, F. 1991. Nitrate Reduction in an Unconfined Sandy Aquifer: Water Chemistry, Reduction Processes, and Geochemical Modeling. Water Resources Research. Vol. 27, No. 8. p. 2027-2045.
- Richards, J. E., Webster, C. P., 1999. Denitrification in the Subsoil of the Broadbalk Continuous Wheat Experiment. Soil Biology and Biochemistry. Vol. 31. No. 5. P. 747-755.
- Rogers, John. 1999. What Should You Do About Nitrogen in Rivers and Ground-Water?. www.geosci.unc.edu.
- Sánchez, Eva. 1997a. Trabajo de Investigación I: Muestreo Geoquímico de Agua Subterránea en Cenotes y Pozos. Reporte de Trabajo de Investigación. Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. 13 p.

INTERPRETACIÓN QUÍMICA DE UN MUESTREO DE AGUAS DE LA PARTE SUPERFICIAL
DEL ACUÍFERO COSTERO DE ACAPETAHUA, CHIAPAS.

- Sánchez, Eva. 1997b. Trabajo de investigación II: Análisis Químico de Agua Subterránea por Métodos Cromatográficos (Cromatografía de Iones). Reporte de Trabajo de Investigación. Maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM. 11 p.
- SMN , 1982. Boletín climatológico, Abril . Servicio Meteorológico Nacional. México.
- SMN, 1998. Servicio Meteorológico Nacional. México. www.cna.gob.mx/SMN.html.
- Steinich, B. y E. Sánchez R., 1998. Estudio Geofísico e Hidrogeoquímico en el Acuífero de Acapetahua, Estado de Chiapas, Instituto de Geología. Unidad de Ciencias de la Tierra, UNAM, Campus Juriquilla, Informe Final, 185 pp.
- Steinich, B., Bocanegra, G. G., Sánchez, R. E. 1999. Basement Topography and Fresh Water Resources in the Coastal Aquifer of Acapetahua, Chiapas, Mexico. Geofísica Internacional. Vol., 38, Num. 2, pp. 107-115.
- Tamayo, J. L. 1962. Geografía General de México V. 1 . 2^{da} Ed. Instituto Mexicano de Investigaciones Económicas. Talleres Gráficos de la Nación. México, D.F. 562 p.
- Tóth, J. 1963. A Theoretical Analysis of groundwater Flow in Small Drainage Basins. Journal of Geophysic. Res. 68. pp. 4795 – 4812.
- U.S.G.S., 1998. PHREEQC V. 1.5. for DOS. United States Geological Survey. L.C., U.S.A. <http://water.usgs.gov/software/phreeqe.html>.

Tabla 1. Parámetros determinados en campo.

No.	Nombre	Fecha y Hora de muestreo	Temp. °C	pH	Conduc. uS/cm	Prof. m.	No.	Nombre	Fecha y Hora de muestreo	Temp. °C	pH	Conduc. uS/cm	Prof. m.
1	El Diamante	21/11/97 17.10	26.6	6.67	646	6.0	31	Nicolás Bravo II	23/11/97 16.40	27.0	7.16	587	4.0
2	Barrio Nuevo	21/11/97 06.35	24.6	6.03	719	3.8	32	Rancho las Flores	24/11/97 07.00	25.6	5.69	240	4.5
3	Finca Las Brisas	21/11/97 07.10	24.1	6.55	482	10.0	33	Valdivia	24/11/97 08.50	26.3	5.36	207	3.0
4	El Arenal	21/11/97 08.05	25.2	6.30	645	6.0	34	López Mateos	24/11/97 09.40	26.2	5.88	243	4.5
5	Río Arriba	21/11/97 13.12	27.0	6.47	2360	2.5	35	Rancho El Suspiro	24/11/97 10.20	27.3	6.71	425	4.5
6	Salvación	21/11/97 09.40	26.3	6.65	6070	4.0	36	Rancho El Vergel	24/11/97 11.05	28.3	6.39	508	4.0
7	Santo Domingo	21/11/97 10.40	25.9	7.33	1003	4.0	37	El Higuero	24/11/97 11.40	27.2	5.80	225	4.5
8	C. Barrio Nuevo	21/11/97 12.20	28.7	7.00	604	4.0	38	Rancho Las Margaritas	24/11/97 12.10	27.6	7.11	974	3.0
9	Rancho Nuevo	21/11/97 13.30	28.0	6.75	1065	4.0	39	El Carpintero	24/11/97 13.45	28.0	5.77	328	3.0
10	Rancho Josué	21/11/97 14.10	28.5	5.78	182	5.0	40	Mapastepec Sur	24/11/97 14.35	27.9	6.70	286	4.0
11	San Felipe	21/11/97 15.50	26.6	6.24	108	6.0	41	Rancho Betania	24/11/97 15.30	27.1	5.97	299	3.0
12	Escuintla Norte	21/11/97 16.30	26.8	6.37	313	4.5	42	San Marcos	24/11/97 16.10	28.2	5.87	275	4.0
13	Rancho San Juan	22/11/97 12.00	27.8	5.57	148	4.0	43	El Pescadero	24/11/97 16.50	26.9	5.85	271	4.0
14	Madronal	22/11/97 13.00	27.7	6.11	272	5.0	44	Santa Teresa	25/11/97 08.10	25.0	6.05	702	3.0
15	Mariano Matamoros	22/11/97 13.30	29.2	6.91	553	4.5	45	Roberto Barrios	25/11/97 09.00	25.9	6.02	297	4.0
16	Los Claveles	22/11/97 14.10	27.4	6.61	404	4.5	46	Ibarra	25/11/97 09.40	26.1	6.64	684	5.0
17	Río Florido	22/11/97 14.45	28.2	7.30	15930	4.5	47	Rancho La Luz	25/11/97 10.10	26.4	6.37	917	4.0
18	Rancho Santa Rosa	22/11/97 15.45	28.0	6.38	943	4.0	48	Rancho El Rosario	25/11/97 11.00	27.0	5.48	179	5.0
19	Los Cerritos	22/11/97 16.40	26.2	7.48	514	4.0	49	Santa Jesús	25/11/97 11.35	27.9	6.14	288	7.0
20	Los Amates	23/11/97 06.05	25.0	5.46	130	4.0	50	Rancho sin nombre	25/11/97 13.00	26.8	5.92	201	3.0
21	Soconusco	23/11/97 07.00	24.9	5.43	95	4.0	51	Abraham González	25/11/97 13.35	26.6	6.09	336	3.0
22	Hidalgo	23/11/97 08.20	25.5	5.20	183	7.0	52	Pino Suárez	25/11/97 14.10	27.5	6.86	1021	3.5
23	Rancho El Potrillo	23/11/97 09.05	25.4	6.00	407	4.0	53	La Alianza	25/11/97 15.05	26.6	6.19	242	4.0
24	El Pataste	23/11/97 10.40	26.7	5.82	128	2.5	54	San Rafael	25/11/97 15.45	26.7	5.49	128	3.0
25	Rancho El Rosario	23/11/97 11.50	26.9	5.69	168	3.0	55	Ruíz Cortinez	26/11/97 06.30	24.3	6.28	359	8.0
26	Rancho Quemado	23/11/97 12.30	27.2	6.20	500	4.5	56	Río San Nicolás	26/11/97 08.00	22.2	7.49	124	0.0
27	Santa Elena	23/11/97 13.10	27.8	6.55	1294	4.5	57	Río Cacaluta	26/11/97 08.45	25.7	7.34	75	0.0
28	Ulapa	23/11/97 14.40	27.9	5.81	179	5.0	58	Rancho Guadalupe	26/11/97 10.10	26.8	5.84	138	4.5
29	Sesecapa	23/11/97 15.20	27.4	5.80	177	8.0	59	Sacoalpita	26/11/97 11.15	26.4	6.59	182	8.0
30	Nicolás Bravo I	23/11/97 16.00	27.0	6.68	401	2.5	60	Río Vado Ancho	26/11/97 11.55	27.2	8.31	133	0.0

Tabla 2. Resultados de los análisis químicos en miligramos por litro (mg/L).

No.	Nombre	Cloruros	Nitritos	Nitratos	Sulfatos	Alcalinidad	Sodio	Potasio	Calcio	Magnesio	TDS
1	El Diamante	76.1	nd	nd	22.2	180	31.4	4.88	54.1	27.4	397
2	Barrio Nuevo	78.9	1.9	22.4	101	108	27.5	27.3	48.5	32.4	448
3	Finca Las Brisas	14.0	7.0	1.90	23.4	119	25.2	11.3	38.5	26.3	267
4	El Arenal	43.8	<1.0	10.0	78.7	169	28.0	2.99	42.0	30.0	405
5	Río Arriba	498	2.6	4.99	79.9	390	200	19.3	69.0	136	1399
6	Salvación	524	< 1.0	29.8	2440	642	679	46.1	303	502	5167
7	Santo Domingo	19.3	1.40	nd	55.8	460	172	8.34	45.8	25.0	787
8	C. Barrio Nuevo	15.1	1.5	nd	30.6	235	43.0	3.44	41.3	27.9	398
9	Rancho Nuevo	58.1	1.3	6.86	122	301	1.96	224	59.8	62.3	837
10	Rancho Josué	6.08	4.5	7.57	6.91	56.2	6.49	10.3	11.6	4.82	114
11	San Felipe	< 1.0	1.5	nd	9.98	47.9	15.2	0.80	4.24	3.35	84
12	Escuintla Norte	7.80	1.8	25.4	8.19	120	6.23	1.12	43.3	5.91	219
13	Rancho San Juan	5.40	1.6	nd	5.76	81.6	22.2	2.17	7.48	5.29	131
14	Madronal	10.3	nd	< 1.0	16.3	133	28.9	3.70	19.1	15.7	228
15	Mariano Matamoros	22.0	1.6	28.1	24.5	156	1.66	46.0	35.0	17.5	333
16	Los Claveles	12.3	3.3	1.57	16.0	152	20.2	2.62	26.5	23.7	258
17	Río Florido	5131	9.1	8.27	990	401	1510	278	326	1217	9870
18	Rancho Santa Rosa	70.8	nd	2.95	82.2	246	82.0	14.1	45.6	343	887
19	Los Cerritos	4.25	2.7	nd	28.4	205	63.1	12.4	22.0	14.2	352
20	Los Amates	4.53	1.2	5.52	4.03	61.7	15.3	1.80	7.17	4.29	106
21	Soconusco	4.04	1.7	nd	3.60	48.6	15.0	3.16	6.61	2.06	84.8
22	Hidalgo	15.4	1.2	34.2	7.16	44.9	12.0	2.79	22.3	3.29	143
23	Rancho El Potrillo	31.1	1.5	4.31	30.5	127	33.6	2.44	34.0	6.56	271
24	El Pataste	4.07	1.9	nd	6.57	48.0	3.76	3.17	13.3	3.18	83.9
25	Rancho El Rosario	10.5	2.8	17.3	12.1	149	58.3	5.13	18.8	1.57	276
26	Rancho Quemado	25.3	2.2	118	26.5	55	12.8	26.9	49.7	12.1	328
27	Santa Elena	99.5	1.4	nd	149	369	217	2.42	50.0	29.7	919
28	Ulapa	6.81	nd	37.9	5.88	72.9	11.6	1.88	27.8	2.86	168
29	Sesecapa	3.61	4.9	6.65	7.19	60.4	11.7	4.80	11.9	4.16	115
30	Nicolás Bravo I	7.24	1.5	nd	16.9	169	17.5	4.30	48.2	6.22	271

Las concentraciones de los iones nitrito y nitrato que no pudieron cuantificarse, debido al límite de detección en el análisis, se reportan como valores menores a 1 mg/L (< 1 mg/L).

La notación-nd en los iones nitrito y nitrato indica que no fueron detectados.

Tabla 2. Resultados de los análisis químicos en miligramos por litro (mg/L). Continuación.

No.	Nombre	Cloruros	Nitritos	Nitratos	Sulfatos	Alcalinidad	Sodio	Potasio	Calcio	Magnesio	TDS
31	Nicolás Bravo II	18.6	2.27	6.85	45.4	211	33.6	6.63	61.0	19.0	404
32	Rancho las Flores	7.85	1.21	< 1.0	3.95	119	4.56	3.90	7.81	22.3	171
33	Valdivia	17.1	2.30	6.45	10.3	62.8	23.2	2.44	14.6	2.74	142
34	López Mateos	9.02	2.01	36.4	11.8	80.6	12.1	5.61	31.8	5.80	195
35	Rancho El Suspiro	14.7	nd	1.19	7.60	180	25.0	5.94	35.0	16.4	286
36	Rancho El Vergel	38.7	2.08	16.1	43.5	129	14.9	25.9	32.1	18.2	320
37	El Higuero	12.5	1.84	1.49	11.2	74.1	2.52	15.1	25.5	5.41	150
38	Rancho Las Margaritas	62.6	1.78	83.8	57.8	297	22.0	10.5	43.0	92.8	671
39	El Carpintero	17.3	2.13	nd	8.57	139	24.5	3.20	32.5	17.1	245
40	Mapastepec Sur	5.58	nd	1.57	7.95	120	1.31	23.1	40.1	3.98	203
41	Rancho Betania	8.52	1.14	6.18	7.42	101	15.9	20.3	21.3	6.24	188
42	San Marcos	10.2	2.01	14.6	14.7	102	3.51	16.3	29.3	13.0	206
43	El Pescadero	20.7	2.14	nd	16.4	108	21.3	3.74	30.5	6.35	209
44	Santa Teresa	78.1	1.46	nd	69.2	179	52.6	4.92	43.5	25.0	454
45	Roberto Barrios	16.1	1.85	nd	15.7	110	13.2	14.0	29.0	5.05	205
46	Ibarra	25.4	1.77	22.6	63.2	323	58.5	14.7	66.8	18.4	594
47	Rancho La Luz	46.5	1.90	243	50.4	83.5	37.4	88.1	65.3	19.9	636
48	Rancho El Rosario	11.4	1.83	26.7	14.9	27.4	13.9	7.54	8.99	3.39	116
49	Santa Jesús	19.9	1.08	5.31	8.23	113	19.3	3.02	31.8	4.59	207
50	Rancho sin nombre	11.1	2.00	2.13	13.7	51.0	13.1	4.61	20.9	1.17	120
51	Abraham González	28.7	1.00	nd	25.7	74.2	19.5	9.84	29.8	3.89	193
52	Pino Suárez	64.2	1.71	2.18	156	272	27.7	4.31	66.0	66.8	661
53	La Alianza	11.5	1.04	nd	15.5	76.7	18.5	1.98	12.3	6.81	144
54	San Rafael	5.13	1.28	nd	9.75	27.3	10.0	11.7	15.7	1.26	82
55	Ruíz Cortinez	17.8	1.87	1.09	12.0	158	18.2	3.16	46.0	5.32	263
56	Río San Nicolás	2.84	2.30	nd	13.5	41.4	5.03	1.78	17.3	1.00	85
57	Río Cacaluta	4.82	2.52	nd	1.76	40.8	11.1	2.99	5.00	1.69	71
58	Rancho Guadalupe	< 1.0	< 1.0	8.77	4.53	59.6	1.80	4.39	25.3	1.80	107
59	Sacoalpita	9.00	2.01	8.12	3.71	63.2	19.0	4.51	9.94	2.38	122
60	Río Vado Ancho	nd	4.12	nd	4.89	74.7	12.7	3.26	11.6	3.79	115

Las concentraciones de los iones nitrito y nitrato que no pudieron cuantificarse, debido al límite de detección en el análisis, se reportan como valores menores a 1 mg/L (< 1 mg/L)

La notación nd en los iones nitrito y nitrato indica que no fueron detectados.

Tabla 3. Resultados de los análisis químicos en miliequivalentes por litro (meq/L).

No.	Nombre	Cloruros	Nitritos	Nitratos	Sulfatos	Alcalinidad	Sodio	Potasio	Calcio	Magnesio
1	El Diamante	2.15	nd	nd	0.46	3.60	1.37	0.12	2.70	2.25
2	Barrio Nuevo	2.23	0.04	0.36	2.11	2.16	1.20	0.70	2.42	2.66
3	Finca Las Brisas	0.39	0.15	0.03	0.49	2.38	1.10	0.29	1.92	2.16
4	El Arenal	1.24	<0.02	0.16	1.64	3.38	1.22	0.08	2.10	2.47
5	Río Arriba	14.0	0.06	0.08	1.66	7.80	8.70	0.49	3.44	11.1
6	Salvación	14.8	<0.02	0.48	50.8	12.8	29.5	1.18	15.1	41.3
7	Santo Domingo	0.54	0.03	nd	1.16	9.18	7.48	0.21	2.28	2.06
8	C Barrio Nuevo	0.43	0.03	nd	0.64	4.70	1.87	0.09	2.06	2.29
9	Rancho Nuevo	1.64	0.03	0.11	2.54	6.01	0.09	5.73	2.98	5.12
10	Rancho Josué	0.17	0.10	0.12	0.14	1.12	0.28	0.26	0.58	0.40
11	San Felipe	<0.03	0.03	nd	0.21	0.96	0.66	0.02	0.21	0.28
12	Escuintla Norte	0.22	0.04	0.41	0.17	2.39	0.27	0.03	2.16	0.49
13	Rancho San Juan	0.15	0.03	nd	0.12	1.63	0.97	0.06	0.37	0.44
14	Madronal	0.29	nd	<0.02	0.34	2.66	1.26	0.09	0.95	1.29
15	Mariano Matamoros	0.62	0.03	0.45	0.51	3.12	0.07	1.18	1.75	1.44
16	Los Claveles	0.35	0.07	0.03	0.33	3.04	0.88	0.07	1.32	1.95
17	Río Florido	145	0.20	0.13	20.6	8.01	65.7	7.11	16.3	100
18	Rancho Santa Rosa	2.00	nd	0.05	1.71	4.92	3.57	0.36	2.28	28.2
19	Los Cerritos	0.12	0.06	nd	0.59	4.09	2.74	0.32	1.10	1.17
20	Los Amates	0.13	0.03	0.09	0.08	1.23	0.67	0.05	0.36	0.35
21	Soconusco	0.11	0.04	nd	0.08	0.97	0.65	0.08	0.33	0.17
22	Hidalgo	0.43	0.03	0.55	0.15	0.90	0.52	0.07	1.11	0.27
23	Rancho El Potrillo	0.88	0.03	0.07	0.63	2.54	1.46	0.06	1.70	0.54
24	El Pataste	0.11	0.04	nd	0.14	0.96	0.16	0.08	0.66	0.26
25	Rancho El Rosario	0.30	0.06	0.28	0.25	2.98	2.53	0.13	0.94	0.13
26	Rancho Quemado	0.71	0.05	1.90	0.55	1.09	0.56	0.69	2.48	0.99
27	Santa Elena	2.81	0.03	nd	3.11	7.38	9.46	0.06	2.50	2.44
28	Ulapa	0.19	nd	0.61	0.12	1.46	0.51	0.05	1.38	0.24
29	Sesecapa	0.10	0.11	0.11	0.15	1.21	0.51	0.12	0.59	0.34
30	Nicolás Bravo I	0.20	0.03	nd	0.35	3.38	0.76	0.11	2.41	0.51

Las concentraciones de los iones nitrito y nitrato que no pudieron cuantificarse, debido al límite de detección en el análisis, se reportan como valores menores a 0.02 meq/L (< 0.02 meq/L).

La notación nd en los iones nitrito y nitrato indica que no fueron detectados.

Tabla 3.

Resultados de los análisis químicos en miliequivalentes por litro (meq/L). Continuación.

No.	Nombre	Cloruros	Nitritos	Nitratos	Sulfatos	Alcalinidad	Sodio	Potasio	Calcio	Magnesio
31	Nicolás Bravo II	0.53	0.05	0.11	0.95	4.21	1.46	0.17	3.04	1.56
32	Rancho las Flores	0.22	0.03	0.01	0.08	2.38	0.20	0.10	0.39	1.83
33	Valdivia	0.48	0.05	0.10	0.21	1.25	1.01	0.06	0.73	0.23
34	López Mateos	0.25	0.04	0.59	0.25	1.61	0.53	0.14	1.58	0.48
35	Rancho El Suspiro	0.41	nd	0.02	0.16	3.59	1.09	0.15	1.75	1.35
36	Rancho El Vergel	1.09	0.05	0.26	0.91	2.57	0.65	0.66	1.60	1.49
37	El Higuero	0.35	0.04	0.02	0.23	1.48	0.11	0.39	1.27	0.45
38	Rancho Las Margaritas	1.77	0.04	1.35	1.20	5.93	0.96	0.27	2.15	7.63
39	El Carpintero	0.49	0.05	nd	0.18	2.79	1.06	0.08	1.62	1.40
40	Mapastepec Sur	0.16	nd	0.03	0.17	2.39	0.06	0.59	2.00	0.33
41	Rancho Betania	0.24	0.02	0.10	0.15	2.03	0.69	0.52	1.06	0.51
42	San Marcos	0.29	0.04	0.24	0.31	2.05	0.15	0.42	1.46	1.07
43	El Pescadero	0.58	0.05	nd	0.34	2.16	0.92	0.10	1.52	0.52
44	Santa Teresa	2.20	0.03	nd	1.44	3.58	2.29	0.13	2.17	2.05
45	Roberto Barrios	0.45	0.04	nd	0.33	2.20	0.57	0.36	1.45	0.42
46	Ibarra	0.72	0.04	0.36	1.32	6.45	2.55	0.38	3.33	1.51
47	Rancho La Luz	1.31	0.04	3.92	1.05	1.67	1.63	2.25	3.26	1.63
48	Rancho El Rosario	0.32	0.04	0.43	0.31	0.55	0.61	0.19	0.45	0.28
49	Santa Jesús	0.56	0.02	<0.02	0.17	2.27	0.84	0.08	1.59	0.38
50	Rancho son nombre	0.31	0.04	0.03	0.29	1.02	0.57	0.12	1.04	0.10
51	Abraham González	0.81	0.02	nd	0.54	1.48	0.85	0.25	1.48	0.32
52	Pino Suárez	1.81	0.04	0.04	3.24	5.44	1.20	0.11	3.29	5.49
53	La Alianza	0.33	0.02	nd	0.32	1.53	0.80	0.05	0.61	0.56
54	San Rafael	0.14	0.03	nd	0.20	0.55	0.44	0.30	0.79	0.10
55	Ruiz Cortinez	0.50	0.04	0.02	0.25	3.16	0.79	0.08	2.30	0.44
56	Río San Nicolás	0.08	0.05	nd	0.28	0.83	0.22	0.05	0.86	0.08
57	Río Cacaluta	0.14	0.05	nd	0.04	0.82	0.48	0.08	0.25	0.14
58	Rancho Guadalupe	<0.03	<0.02	0.14	0.09	1.19	0.08	0.11	1.26	0.15
59	Sacoalpita	0.25	0.04	0.13	0.08	1.26	0.82	0.12	0.50	0.20
60	Río Vado Ancho	nd	0.09	nd	0.10	1.49	0.55	0.08	0.58	0.31

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Las concentraciones de los iones nitrito y nitrato que no pudieron cuantificarse, debido al límite de detección en el análisis, se reportan como valores menores a 0.02 meq/L (<0.02 meq/L).

La notación nd en los iones nitrito y nitrato indica que no fueron detectados.

Tabla 4. Resultados para el porcentaje de error en los análisis químicos.

No.	Nombre	Suma de Aniones meq/L	Suma de Cationes meq/L	% de Error	No.	Nombre	Suma de Aniones meq/L	Suma de Cationes meq/L	% de Error
1	El Diamante	6.21	6.44	1.80	31	Nicolás Bravo II	5.84	6.24	3.32
2	Barrio Nuevo	6.90	6.98	0.55	32	Rancho las Flores	2.72	2.52	-3.88
3	Finca Las Brisas	3.45	5.47	22.7	33	Valdivia	2.10	2.03	-1.82
4	El Arenal	6.43	5.86	-4.64	34	López Mateos	2.74	2.73	-0.20
5	Río Arriba	23.6	23.8	0.29	35	Rancho El Suspiro	4.18	4.33	1.73
6	Salvación	78.9	87.1	4.94	36	Rancho El Vergel	4.87	4.41	-5.00
7	Santo Domingo	10.9	12.0	4.85	37	El Higuero	2.13	2.22	1.92
8	C. Barrio Nuevo	5.80	6.31	4.21	38	Rancho Las Margaritas	10.3	11.0	3.33
9	Rancho Nuevo	10.3	13.9	14.8	39	El Carpintero	3.50	4.17	8.77
10	Rancho Josué	1.66	1.52	-4.38	40	Mapastepec Sur	2.74	2.98	4.19
11	San Felipe	1.22	1.17	-2.28	41	Rancho Betania	2.55	2.79	4.52
12	Escuintla Norte	3.23	2.94	-4.58	42	San Marcos	2.92	3.09	2.87
13	Rancho San Juan	1.94	1.83	-2.81	43	El Pescadero	3.13	3.06	-1.05
14	Madronal	3.30	3.59	4.31	44	Santa Teresa	7.26	6.64	-4.46
15	Mariano Matamoros	4.74	4.43	-3.33	45	Roberto Barrios	3.02	2.79	-3.90
16	Los Claveles	3.82	4.21	4.84	46	Ibarra	8.52	7.76	-4.65
17	Río Florido	1.74	1.89	4.27	47	Rancho La Luz	7.99	8.77	4.69
18	Rancho Santa Rosa	8.67	34.4	59.8	48	Rancho El Rosario	1.65	1.53	-3.83
19	Los Cerritos	4.86	5.33	4.60	49	Santa Jesús	3.11	2.88	-3.80
20	Los Amates	1.56	1.42	-4.57	50	Rancho sin nombre	1.69	1.83	3.81
21	Soconusco	1.20	1.23	1.43	51	Abraham González	2.85	2.90	0.95
22	Hidalgo	2.06	1.97	-2.12	52	Pino Suárez	10.6	10.1	-2.24
23	Rancho El Potrillo	4.16	3.76	-4.98	53	La Alianza	2.20	2.03	-4.14
24	El Pataste	1.25	1.17	-3.44	54	San Rafael	0.92	1.62	27.6
25	Rancho El Rosario	3.87	3.73	-1.83	55	Ruiz Cortinez	3.97	3.61	-4.75
26	Rancho Quemado	4.31	4.72	4.55	56	Río San Nicolás	1.24	1.21	-1.30
27	Santa Elena	13.3	14.5	4.07	57	Río Cacaluta	1.04	0.95	-4.72
28	Ulapa	2.38	2.17	-4.58	58	Rancho Guadalupe	1.45	1.60	4.79
29	Sesecapa	1.67	1.57	-3.24	59	Sacoalpita	1.77	1.63	-4.02
30	Nicolás Bravo I	3.97	3.79	-2.36	60	Río Vado Ancho	1.68	1.53	-4.84

Tabla 5. Relación SO₄ / Ca (x 1000).

No.	Nombre	SO ₄ /Ca	No.	Nombre	SO ₄ /Ca
	agua de mar *	6594			
1	El Diamante	411	31	Nicolás Bravo II	744
2	Barrio Nuevo	2092	32	Rancho las Flores	506
			33	Valdivia	702
4	El Arenal	1874	34	López Mateos	373
5	Río Arriba	1158	35	Rancho El Suspiro	217
6	Salvación	8052	36	Rancho El Vergel	1353
7	Santo Domingo	1220	37	El Higuero	438
8	C. Barrio Nuevo	741	38	Rancho Las Margaritas	1345
10	Rancho Josué	598	40	Mapastepec Sur	198
11	San Felipe	2353	41	Rancho Betania	348
12	Escuintla Norte	189	42	San Marcos	503
13	Rancho San Juan	770	43	El Pescadero	539
14	Madronal	854	44	Santa Teresa	1591
15	Mariano Matamoros	699	45	Roberto Barrios	541
16	Los Claveles	606	46	Ibarra	946
17	Río Florido	3036	47	Rancho La Luz	772
			48	Rancho El Rosario	1658
19	Los Cerritos	1291	49	Santa Jesús	259
20	Los Amates	562	50	Rancho sin nombre	655
21	Soconusco	545	51	Abraham González	865
22	Hidalgo	322	52	Pino Suárez	2356
23	Rancho El Potrillo	896	53	La Alianza	1262
24	El Pataste	495			
25	Rancho El Rosario	644	55	Ruiz Cortinez	260
26	Rancho Quemado	534	56	Río San Nicolás	785
27	Santa Elena	2988	57	Río Cacaluta	352
28	Ulapa	212	58	Rancho Guadalupe	179
29	Sesecapa	604	59	Sacoalpita	373
30	Nicolás Bravo I	351	60	Río Vado Ancho	421

Las concentraciones fueron tomadas en mg/L

* Fuente. Drever, 1998.

Tabla 6. Clasificación simple de las aguas subterráneas con base en los sólidos totales disueltos (STD).

Fuentes: Davies y DeWiest, 1966 y Freeze y Cherry, 1979.

TIPO DE AGUA	SOLIDOS TOTALES DISUELTOS (mg/L)
Agua dulce	$\leq 1\ 000$
Agua salobre	$> 1\ 000$
Agua salada	$\geq 10\ 000$
Salmuera	$> 100\ 000$