



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS

**ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO Y DE CONTAMINANTES EN AGUA
SUBTERRÁNEA DE ABASTO A LAS COMUNIDADES RURALES
DEL MUNICIPIO DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA.**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

O C E A N Ó L O G O

PRESENTA:

LEONARDO RUIZ MONTOYA

Ensenada, Baja California, Septiembre 2008

RESUMEN

Entre mayo y junio del 2007 se estudiaron muestras de agua subterránea de 26 pozos pertenecientes a la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE) en comunidades rurales del municipio de Ensenada. El análisis se llevó a cabo con la finalidad de describir los diferentes tipos de agua por medio de su composición química. Se realizó el análisis de contaminantes potenciales como As, F y NO_3 . Se encontró que el tipo de agua predominante es Ca-Na-Cl. El tipo de agua en Bahía de Los Ángeles es de tipo Na-HCO_3^- Cl. Dos pozos pertenecientes a los acuíferos sobre los cuales existe un amplio uso agrícola (San Quintín y San Simón) superaron el valor permisible de N- NO_3 (10 mg l^{-1}) con 16.2 y 20.3 mg l^{-1} . La intrusión de agua salina en estos acuíferos es apreciable por la cantidad de sólidos disueltos totales, los cuales están por arriba del límite permitido (1 g l^{-1}) en todos, menos tres de los pozos estudiados, siendo estos, el Aguaje No. 1 en Isla de Cedros, y los dos estudiados en Maneadero. El As se mantuvo por debajo del límite permisible por la norma mexicana, sin embargo, los pozos Nuevo Rosarito, Maneadero 2 y Bahía de los Ángeles mostraron valores superiores al recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de $10 \mu\text{g l}^{-1}$, lo cual puede presentar un riesgo para la salud. Cuatro pozos superaron el valor permitido de F de 1.5 mg l^{-1} (Bahía de los Ángeles, Punta Prieta, Raúl Sánchez Díaz y Maneadero 2). En Maneadero se sugiere que los altos valores de F se asocian a actividad geotermal, mientras en Bahía de los Ángeles la dominancia del catión Na sobre Ca permite asumir que se pueda deber a la interacción agua-roca durante un período prolongado.

ESTUDIO HIDROGEOQUÍMICO Y DE CONTAMINANTES EN AGUA
SUBTERRÁNEA DE ABASTO A LAS COMUNIDADES RURALES DEL
MUNICIPIO DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA.

T E S I S

QUE PRESENTA:

LEONARDO RUIZ MONTOYA

Aprobada por:



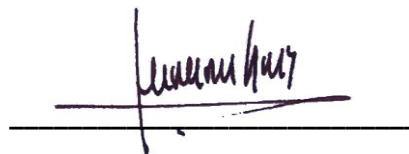
Presidente del Jurado

Dr. Luis Walter Daesslé Heuser



Sinodal Propietario

Dra. Ana Luz Quintanilla Montoya



Sinodal Propietario

Dr. Leopoldo Guillermo Mendoza Espinosa

Con voluntad y cariño

A mis papás, Marcela y Francisco

A mis hermanos, Ceci y Berni

“La paciencia tiene más poder que la fuerza”

(Plutarco, 46-125 d.C.)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de manera muy especial al Dr. Walter por todo su apoyo y enseñanza, aún con el Atlántico de distancia.

A mis Sinodales: Dr. Leopoldo Mendoza y Dra. Ana Luz Quintanilla, por hacer realidad esta tesis.

A CESPE, en especial a Andrés Millán por todo el trabajo de campo, apoyo así como por su valioso tiempo; a la CNA, sobre todo al Oc. Carlos Gómez por brindarme los reportes y antecedentes necesarios para este trabajo.

A la M.C. Karina Lugo por todo el trabajo y experiencia durante este tiempo; a los M.C. Eduardo Ortiz y M.C Ulises Moreno por su apoyo en el laboratorio.

A mi familia por enseñarme a descubrir las maravillas de la vida, por todas las sonrisas, el cariño, los viajes... y por su apoyo incondicional durante toda la carrera, ¡gracias!

A Andrea por la paciencia, el apoyo constante y por el cariño de todo este tiempo.

A todos mis amigos de generación Briagocystis: Eder, Karlita, Nico, Ale, Magali, Ariadna, Dinorah, Beto, Karla, Benja, Moy; a toda la banda de Tlax: Bul, Amalia, Lalo, Maca, Pablo, Angélica, Viviana Barbosa, Viviana Espinosa y Joan; y al resto de compas: Tihui, Cuapa, Jazz, Magui, Juana, China, Felipe Gómez, Pucho, Iván, Fabas, Natalie.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1 Importancia del Agua Subterránea.....	7
1.2 El agua subterránea en México.....	8
1.3 El Agua Subterránea en Baja California.....	10
1.4 Hidrogeoquímica del As.....	12
1.5 Hidrogeoquímica del F.....	13
1.6 Hidrogeoquímica del NO ₃	14
2. ANTECEDENTES.....	16
2.1 Los acuíferos del Municipio de Ensenada.....	16
2.2 As en agua subterránea en México.....	17
2.3 F en agua subterránea en México.....	18
2.4 N-NO ₃ en agua subterránea en México.....	19
3. HIPÓTESIS.....	21
4. OBJETIVO.....	21
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	22
5.1 Área de Estudio.....	22
5.1.1 Ubicación de los sitios de colecta de muestras.....	22
5.1.2 Hidrografía.....	25
5.1.3 Clima.....	25
5.1.4 Precipitación, temperatura y evaporación.....	26
5.1.5 Acuífero Maneadero.....	26
5.1.6 Acuífero San Quintín.....	27
5.1.7 Acuífero San Simón.....	28
5.1.8 Acuífero el Rosario.....	29
5.1.9 Acuífero Bahía de Los Ángeles.....	30
5.1.10 Acuífero La Bachata-Santa Rosalita.....	31
5.1.11 Acuífero Nuevo Rosarito.....	31
5.1.12 Acuífero Villa Jesús María.....	32
5.1.13 Acuífero Isla de Cedros y Cataviña.....	33
5.2 Metodología.....	34
6. RESULTADOS.....	36
6.1 Fisicoquímicos.....	36
6.2 Nutrientes.....	37

6.3	Iones Mayores.....	39
6.4	F.....	40
6.5	As.....	40
6.6	Metales.....	40
6.7	Tipos de Agua.....	42
7.	DISCUSIONES.....	43
7.1	Caracterización de tipos de agua.....	43
7.2	F.....	45
7.3	N-NO ₃ ⁻	46
7.4	As.....	47
8.	CONCLUSIONES.....	47
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	49

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla I	Balance geohidrológico de los acuíferos estudiados	17
Tabla II	Sitios de colecta de Agua subterránea en pozos de CESPE.	23
Tabla III	Parámetros fisicoquímicos y nutrientes obtenidos en las muestras estudiadas.	38
Tabla IV	Valores de Iones mayores, metales, As y F.	41
Tabla V	Coefficientes de Correlación entre variables estudiadas	43
Figura 1	Ubicación de los Pozos muestreados, geología del Estado, los acuíferos en los que éste se divide, y los límites de cada municipio	24
Figura 2	Clasificación de aguas mediante porcentaje de composición Iónica.	42

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia del agua subterránea.

El agua siempre ha jugado un papel fundamental dentro de la historia del hombre. Más aún, el agua es un recurso clave para el desarrollo sustentable, y para el alivio de la pobreza, ya que constituye la materia prima de prácticamente toda la producción relacionada con agricultura, industria, energía y transporte. También puede convertirse en una fuerza de destrucción, durante sequías, inundaciones, desertificación, contaminación y enfermedades (Grey , 2006).

De la cantidad total de agua sobre la tierra, los océanos contienen la mayor proporción: (97.13%); los casquetes polares y los glaciares contienen 2.24%; el agua subterránea representa el 0.61% y los ríos, lagos y corrientes superficiales sólo el 0.02% (Jenkins , 2004).

El agua posee de manera natural material disuelto debido al equilibrio precipitación-disolución del agua, con los minerales de las rocas circundantes, o confinantes. La calidad del agua se puede ver afectada por diferentes actividades del hombre, incluyendo la descarga de desechos municipales, industriales y agrícolas a las aguas superficiales y subterráneas, los desechos domésticos aumentan el contenido de materia mineral y orgánica en las aguas naturales (Jenkins , 2004).

Toda el agua que se encuentra en forma natural por debajo de la superficie terrestre recibe el nombre de agua subsuperficial, independientemente de que esté en la zona saturada o en la no saturada. Al agua en la zona saturada, es decir, la que se encuentra debajo del nivel freático, se le llama agua subterránea (Price, 2003).

Durante la precipitación pluvial, el agua cae sobre la superficie de la tierra y establece contacto con rocas, sedimento y suelo. Es así como comienzan las reacciones químicas que modifican la composición del agua. Estas reacciones se pueden considerar como una titulación ácido-base, en donde los ácidos del agua de lluvia (CO_2 , SO_2 , NO_x) neutralizan las bases de las rocas. Debido a que la composición de la superficie terrestre y el grado de actividad biológica, varían de un lugar a otro, es de esperarse que de estas reacciones se produzcan aguas de muy diversas composiciones. El tiempo y el grado de contacto entre el agua y las rocas también influye sobre la composición de la solución que potencialmente formará el agua subterránea (Jenkins, 2004).

Localizada a diversas profundidades debajo del suelo, el agua subterránea se encuentra resguardada de los cambios de temperatura y protegida de la evaporación. Debido a la profundidad a la que suele encontrarse, el agua subterránea es, por lo general, menos vulnerable a la contaminación que agua el superficial (Price, 2003).

El conocimiento de la calidad del agua subterránea y su distribución espacial es importante desde el punto de vista de agua asequible para el abastecimiento. También lo es por la información que puede rendir acerca de la dirección y dimensiones de los patrones de flujo subterráneo. A medida que el agua subterránea se mueve en la zona saturada, desde las zonas de recarga hasta las de descarga, generalmente se incrementa su contenido de sólidos disueltos totales (Carrillo, 2003).

1.2 El agua subterránea en México

México tiene una larga historia de gestión del agua y de instituciones afines a ésta, con una ley del agua, un organismo nacional rector del agua, asociaciones de usuarios del agua, consejos de cuenca, un sistema de derechos del agua y un incipiente mercado del agua. Sin

embargo, el agua se está convirtiendo, cada día más, en una restricción efectiva en varias regiones de México; afectando la competitividad y la sustentabilidad de la economía en general y, en particular, de la población con menores recursos y de las zonas rurales. La población de México se ha cuadruplicado en los últimos 50 años. Cerca del 80% de la población en rápido crecimiento se concentra actualmente en las zonas norte y central en las cuales se concentra el 80% del PIB, más del 90% del riego y el 75% de la actividad industrial (Asad, 2006).

Los desafíos actuales del país también incluyen una baja productividad del agua para riego, sobreexplotación de aguas subterráneas en los acuíferos más importantes, y una extensa contaminación del agua. La fijación inadecuada de precios del agua ha promovido prácticas de riego ineficientes y el uso de los escasos recursos hídricos para el riego de cultivos de bajo valor. Aunque parte del riego está cambiando a técnicas para ahorro del agua, la tendencia es limitada y la combinación de cultivos sigue siendo prácticamente la misma debido a que los precios no reflejan la escasez de agua. El bombeo intensivo de agua subterránea ha dado lugar a la sobreexplotación de más de 100 de los 653 acuíferos con que cuenta el país, de acuerdo con datos del 2003 (Asad, 2006). La sobreexplotación del agua subterránea se estima que alcance, casi el 40% del total de aguas subterráneas explotadas. El valor del agua subterránea sobreexplotada, tan solo para la producción agrícola, se estima en más de \$1 200 millones de dólares. El bombeo de agua subterránea se fomenta por las tarifas de electricidad altamente subsidiadas. El abatimiento de los acuíferos de agua subterránea y el uso deficiente del agua para fines agrícolas compromete el crecimiento de las regiones económicas más dinámicas de México (Grey , 2006).

En el país, más del 75% del recurso hídrico que se destina a uso urbano tiene su origen en el subsuelo. En algunas ciudades y regiones como el municipio de Ensenada en

Baja California es del 100%. De igual manera proviene del subsuelo un 75% del agua que se incorpora a los procesos industriales y un 30% del agua usada para riego (Carrillo, 2003).

Asimismo, se utiliza el 15% del volumen de disponibilidad natural media de agua. Sin embargo en el norte del país se utiliza más del 40% de la disponibilidad natural media, lo que se considera por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) como una fuerte presión sobre el recurso hídrico (CNA, 2003).

Desde 1975 ha aumentado sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados en México: 32 en 1975, 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2001 y 102 en 2003 (Grey, 2006).

1.3 El Agua Subterránea en Baja California

Debido a la escasa precipitación pluvial en Baja California, los escurrimientos superficiales son casi nulos, con excepción del Río Colorado, que aporta el 100% del agua para uso urbano en Mexicali y 94.5% en Tijuana y Rosarito (CESPT, 2003). La renovación de las fuentes subterráneas es demasiado lenta para efectos productivos; el recurso hidrológico subterráneo podría incluso considerarse como no renovable. Otros factores adversos que limitan la disponibilidad del agua, son la escasa capacidad de almacenamiento de la mayoría de los acuíferos y el riesgo de su contaminación con la entrada de agua de mar (INEGI, 2007).

La sobreexplotación de acuíferos es resultado de la modificación sustancial de las características socioeconómicas de la región, las cuales están vinculadas al recurso hídrico. En 1939 se inició la operación de la zona de riego del Río Colorado, que en 1955 se formalizó con la creación del Distrito de Riego 014. Para esas fechas la población de la península era escasa (menos de 200 000 habitantes) y la principal actividad era la agrícola.

Por tal motivo, los volúmenes de agua superficial del río Colorado, procedentes de los Estados Unidos de América fueron destinados en su totalidad al uso agrícola. El tratado firmado por ambos países en 1944, estableció que Estados Unidos debe entregar anualmente a México 1 850 millones de metros cúbicos (Mm^3) de agua proveniente del Río Colorado (CNA, 2003).

Dado que el agua superficial aprovechable en la región norte del estado se encuentra totalmente comprometida, las necesidades del recurso han sido cubiertas mediante la explotación de nuevos pozos para abastecer a zonas urbanas y agrícolas. Sin embargo, el acelerado crecimiento poblacional de la región demanda la extracción de volúmenes de agua subterránea en cantidades cada vez mayores, lo que provoca que los acuíferos que subyacen en las localidades más habitadas, así como los de las zonas de riego con mayor extensión, se encuentren sobreexplotados y presenten abatimiento de sus niveles estáticos e intrusión salina y otros contaminantes derivados de fertilizantes, pesticidas o la propia litología del acuífero. Es evidente que la dinámica de crecimiento poblacional en la región, sobre todo en la zona fronteriza, no se modificará sustancialmente en los próximos años por lo que se espera que, de no aplicarse medidas correctivas, continúe creciendo la demanda de agua región (CNA, 2003). De ocurrir esto, el agua requerida habrá de ser obtenida de gran parte de los acuíferos, lo que provocará mayores desequilibrios en los acuíferos. Por ello, se debe alcanzar, al menos, el equilibrio de los acuíferos, o buscar otras soluciones, como el reuso de las aguas para riego agrícola ó la instalación de plantas desaladoras de agua marina.

1.4 Hidrogeoquímica del As

El As es un elemento que se encuentra en la atmósfera, la tierra, en rocas y aguas naturales, así como en organismos. Este elemento se moviliza en el ambiente por medio de procesos naturales, como reacciones debidas al intemperismo, actividad biológica, emisiones volcánicas y por actividades antropogénicas (Smedley, 2002).

De las diferentes fuentes de As en el ambiente, el agua potable es la que probablemente presenta una mayor amenaza a la salud humana (como precursor de cáncer o enfermedades del sistema vascular, entre otros). El agua potable se deriva de diferentes fuentes dependiendo de la disponibilidad local: agua superficial (ríos, lagos, presas), agua subterránea (acuíferos) y agua de lluvia. Estas fuentes son muy variables en términos de riesgo por As, siendo las aguas subterráneas las que pueden llegar a poseer una mayor concentración como resultado de la interacción agua-roca y la tendencia favorable por condiciones físicas y geoquímicas dentro del acuífero para una mayor movilización y acumulación de As.

Existen muy pocas estimaciones sobre la concentración de As en la corteza terrestre, aunque generalmente se considera que es baja. Onishi y Sandell (1955) reportaron una concentración promedio de As en la litósfera de 2 mg kg^{-1} . El As en el ambiente se puede encontrar en varios estados de oxidación (-3, 0, +3 y +5). Sin embargo, en las aguas es más común que se encuentre en forma inorgánica como un oxianión, ya sea trivalente (As III) o pentavalente como arsenato (As V). El pH y potencial redox (Eh) son los factores más importantes en el control de las diferentes especiaciones. Bajo condiciones oxidantes, el arsénico se encuentra mayormente en forma de H_2AsO_4^- a un pH bajo (<6.9), mientras que a pH más alto lo es el HAsO_4^{2-} . El H_3AsO_4^0 y AsO_4^{3-} pueden estar presentes en condiciones extremadamente ácidas y alcalinas respectivamente. Bajo condiciones

reductoras a un pH menor a 9.2 predominan las especies sin carga de arsenita H_3AsO_3^0 (Brookins, 1988; Yan *et al.*, 2000).

El valor recomendado como máximo permisible de As en agua potable por la Organización Mundial de la Salud, fue reducido provisionalmente en 1993 de $50 \mu\text{g l}^{-1}$ a $10 \mu\text{g l}^{-1}$. La modificación a la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) establece un máximo permisible de $25 \mu\text{g l}^{-1}$ de As, a partir del año 2005 en agua para uso y consumo humano (DOF, 2000).

1.5 Hidrogeoquímica del F

El F es el miembro más ligero del grupo de los halogenados, y es uno de los elementos químicos más reactivos, razón por la cual no se encuentra como elemento molecular flúor (F) en el ambiente. Es el más electronegativo de todos los elementos (Hem, 1989), lo que significa que tiene una fuerte tendencia para adquirir carga negativa y en solución forma iones F^- .

El F en el ambiente es por lo tanto encontrado como fluoruros, los cuales representan del 0.06-0.09 % de la corteza terrestre. Los fluoruros se encuentran a niveles significativos en una amplia variedad de minerales, incluyendo la criolita, apatita, micas, hornblendas y otros (Murray, 1986).

El F es uno de los pocos elementos químicos que han mostrado ser la causa de efectos significativos en el ser humano a través de la ingestión de agua. Este tiene efectos benéficos en los dientes a bajas concentraciones en el agua para tomar, pero una exposición excesiva a aguas con F, o en combinación con exposición a alguna otra fuente de flúor, puede dar lugar a diversos efectos negativos. Estos pueden variar desde una fluorosis leve o moderada, que es una hipomineralización por el aumento de la porosidad en los dientes,

hasta una fluorosis esquelética severa, conforme se incrementa el tiempo de exposición, trayendo consigo el debilitamiento de esmalte dental o huesos (Fordyce et al, 2007).

El F se encuentra presente en todas las aguas naturales. El agua de mar contiene típicamente 1 mg l^{-1} , mientras que los ríos y lagos muestran concentraciones menores a 0.5 mg l^{-1} . En aguas subterráneas pueden ocurrir concentraciones bajas o altas, dependiendo de la naturaleza de las rocas y la carga de minerales con fluoruros que éstas contengan. En 1984, la OMS condujo una revisión extensiva y encontró que los datos son insuficientes para concluir que los fluoruros puedan ser causa de cáncer o defectos de nacimiento. Además, determinó que la fluorosis dental está asociada a niveles superiores a 1.5 mg l^{-1} y la fluorosis esquelética se puede dar cuando los niveles de flúor superan los 10 mg l^{-1} . Por lo tanto, el valor recomendado por la OMS como límite máximo de flúor en el agua para consumo humano es de 1.5 mg l^{-1} (Fawell, 2006).

La modificación a la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) establece un máximo permisible de 1.50 mg l^{-1} para F^- en agua para uso y consumo humano (DOF, 2000).

1.6 Hidrogeoquímica del NO_3

El nitrato y el nitrito son iones que están presentes de manera natural en el ciclo del nitrógeno; el ión nitrato (expresado en el presente trabajo como N-NO_3^-) es la forma estable de compuestos nitrogenados en sistemas oxigenados. Aunque no es reactivo químicamente, puede ser reducido por acción microbiana. El ión nitrito (NO_2^-) contiene nitrógeno en un estado de oxidación relativamente inestable. Procesos químicos y biológicos pueden reducir el nitrito a varios compuestos u oxidarlo a nitrato (Spren, 1987).

El nitrato es usado principalmente en fertilizantes inorgánicos. También es utilizado como agente oxidante en la producción de explosivos, y el nitrato libre de potasio es usado para hacer vidrio. El NO_3 potásico es usado como preservativo de alimentos.

El NO_3 puede alcanzar aguas superficiales y aguas subterráneas como resultado de actividades agrícolas, industriales, descarga de aguas residuales y de la oxidación de desechos nitrogenados, en excreta animal y humana; incluyendo fosas sépticas (Wakida, 2005).

Bajo condiciones aeróbicas el nitrato puede filtrarse en grandes cantidades dentro del acuífero debido a la pequeña extensión en la que ocurre la degradación o denitrificación. Bajo condiciones anaeróbicas, el nitrato puede ser denitrificado o degradado, casi completamente a nitrógeno gaseoso. La fijación de nitratos por las plantas, es responsable por la mayor parte de reducción de nitrato en agua superficial (WHO, 2007).

El incremento en uso de fertilizantes, la disposición de los desechos (particularmente de las granjas) y los cambios en el uso de la tierras, son los mayores factores responsables del incremento progresivo de NO_3 en acuíferos durante los últimos 20 años. En Dinamarca y los Países Bajos, por ejemplo, las concentraciones de N-NO_3^- se han incrementado, de 0.2 a 1.3 mg l^{-1} por año en algunas áreas (WHO, 1985). Debido al efecto natural de retraso entre la respuestas del agua subterránea con respecto a los cambios en la tierra, algunos de los acuíferos que están en peligro de ser contaminados, aún no muestran el incremento esperado por el aumento en el uso de fertilizantes nitrogenados. Una vez que el NO_3 alcanza los acuíferos, éstos permanecen contaminados por décadas, incluso aunque se presente una reducción significativa en la carga de nitrato en la superficie (WHO, 2007).

En la mayoría de los países, los niveles de N-NO_3^- en agua potable proveniente de agua superficial no excede los 10 mg l^{-1} . Sin embargo, mayores concentraciones pueden

presentarse como resultado de las descargas de drenaje o algunos tipos de efluentes industriales.

El valor sugerido como máximo permitido por la OMS, para NO_3^- es de 50 a 100 mg l^{-1} , basado en evidencia epidemiológica para metahemoglobinemia en infantes, que es la incapacidad de la sangre para trasportar oxígeno y CO_2 como resultado de altos niveles de nitratos en agua. La modificación a la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) establece un máximo permisible de 10 mg l^{-1} para N-NO_3^- en agua para uso y consumo humano en México (DOF, 2000).

2. ANTECEDENTES

2.1 Los acuíferos del Municipio de Ensenada

De acuerdo con el censo de 2005, el estado de Baja California cuenta con un total de 2 844 469 habitantes, de los cuales 413 481 corresponden al municipio de Ensenada. En éste, la población que habita zonas con una población inferior a los 2 500 habitantes, suma 61 283. El 7.02% de la población en Baja California, habita en zonas rurales (INEGI, 2005).

En cuanto al balance de aguas subterráneas, Baja California se encuentra con un déficit de 120.40 Mm^3 , por lo que varios de los acuíferos en el Estado se encuentran altamente sobreexplotados, lo que ha ocasionado el abatimiento de los niveles estáticos (Tabla I).

Tabla I Balance geohidrológico de los acuíferos estudiados (CNA, 2003).

Acuífero	Recarga (Mm ³ /año)	Extracción (Mm ³ /año)	Balance	Condición geohidrológica
Maneadero	20.8	25.76	-4.96	Sobreexplotado
San Quintín	19.1	24.4	-5.3	Sobreexplotado
San Simón	13.5	19	-5.5	Sobreexplotado
El Rosario	3	3	0	En equilibrio
Punta Canoas-San José	1.03	0.02	1.01	Subexplotado
La Bachata-Santa Rosalita	1.5	0.11	1.39	Subexplotado
Bahía de los Ángeles	0.5	0.11	0.39	Subexplotado
Nuevo Rosarito	1.5	0.49	1.01	Subexplotado
Villa de Jesús María	1.5	0.78	0.72	Subexplotado

2.2 As en agua subterránea en México

Un amplio número de acuíferos en diferentes partes del mundo han sido identificados, por tener As, con concentraciones superiores a 50 $\mu\text{g l}^{-1}$, como en ciertas partes de Argentina (Hopenhayn, 1996) y Bangladesh (Ahmed, 2004). También se ha reportado As en zonas asociadas a aguas geotermales como en Nueva Zelanda (Robinson, 1995) o Japón (Yokoyama, 1993).

En la región lagunera (Durango-Coahuila), en la parte norte de México, se ha documentado que las altas concentraciones de As, en aguas subterráneas, dan como resultado problemas crónicos de salud. La región es árida y el agua subterránea es una fuente importante para abastecimiento de agua potable; las aguas en esa región son predominantemente oxidantes, con un pH de neutro a alto. Del Razo *et al.* (1990) reportaron valores de pH en el rango de 6.3 a 8.9 para esta zona y encontraron concentraciones de As, en el rango de 8 $\mu\text{g l}^{-1}$ a 624 $\mu\text{g l}^{-1}$ (promedio de 100 $\mu\text{g l}^{-1}$, n=128), con la mitad de las muestras teniendo concentraciones mayores a 50 $\mu\text{g l}^{-1}$. También detectaron que la mayoría de las muestras investigadas de agua subterránea contenían As

presente, predominantemente como As (V). Del Razo *et al.* (1994) determinaron que la concentración promedio de As en agua potable para el poblado de Santa Ana, es de $404 \mu\text{g l}^{-1}$. Se estima que la población que está expuesta, a agua con As, en una concentración superior a los $50 \mu\text{g l}^{-1}$ es de alrededor de 400 000 en la región lagunera (Smedley *et al.*, 2002).

Además, el As en agua subterránea representa un problema en otras regiones de México como Durango, Coahuila, Salamanca (Guanajuato), Zimapán (Hidalgo), entre otros. En Zimapán, las interacciones agua-roca han contaminado los pozos profundos, y se han encontrado concentraciones de As de hasta $1\ 100 \mu\text{g l}^{-1}$. A su vez, la extracción y el procesamiento de minas de plata, plomo y zinc, han sido identificados como uno de los problemas de contaminación ambiental por As en pozos poco profundos (Méndez & Armienta, 2003).

2.3 F en agua subterránea en México

Estudios hechos por Grimaldo *et al.* (1995) señalaron que en la ciudad de San Luis Potosí, el 98% de los niños expuestos a aguas con concentraciones de flúor, mayores a 2 mg l^{-1} exhibieron, signos de fluorosis dental.

Por su parte, Díaz Barriga *et al.* (1997) estimaron que aproximadamente 5 millones de personas en diversas zonas de México, pueden estar expuestas a niveles elevados de F en el agua. A nivel nacional, la media de concentraciones de F en poblaciones urbanas varió de 1.5 a 2.8 mg l^{-1} , mientras que otras fuentes individuales, han registrado concentraciones de hasta 7.8 mg l^{-1} (Hermosillo, Sonora). En zonas rurales se han registrado niveles entre 0.9 y 4.5 mg l^{-1} , y el más alto registrado, con un valor de 8 mg l^{-1} (Abasolo, Guanajuato). En los estados de Aguascalientes, Chihuahua, Coahuila, Durango, Guanajuato, San Luis

Potosí y Sonora también existen elevadas concentraciones de F en agua (Díaz-Barriga *et al.*, 1997).

Estudios llevados a cabo por Valenzuela *et al.* (2006), corroboraron la presencia de concentraciones anómalas de F en la zona de La Victoria, al noreste de Hermosillo, Sonora. El acuífero, fue muestreado en 22 pozos durante 1995-2003, y 14 de ellos presentaron valores superiores a 1.5 mg l^{-1} , oscilando entre 0.53 y 7.59 mg l^{-1} .

Lozano Montemayor (1992) estudió cuatro grupos de niños, de distintas edades, en Ensenada, Baja California. Los niños fueron estudiados en cuatro diferentes tiempos, de 1979 a 1990; éstos presentaron alta presencia de fluorosis dental. Dicho estudio hace mención, de que históricamente, la media y rango del contenido de fluoruros en el agua potable en la ciudad de Ensenada ha cambiado; identificando cuatro períodos: (1) finales de la década de 1950 mostrando 8 mg l^{-1} de fluoruros; (2) 1980 con agua subterránea con un valor de 4.6 mg l^{-1} ; (3) 1981 en agua embotellada con valores entre 0.51 - 2.62 mg l^{-1} ; y (4) a principios de los años 90's, en agua potable, con contenidos desde 0 hasta 2.6 mg l^{-1} de fluoruros (Soto-Roja *et al.*, 2004).

2.4 N-NO₃ en agua subterránea en México

El estudio del NO₃ es de importancia, debido al daño causado a la salud humana cuando está presente en altas concentraciones. Las consecuencias en la salud, incluyen metahemoglobinemia en infantes, y se sospecha que causa cáncer gástrico en adultos (Johnson *et al.*, 1991).

La concentración natural de N-NO₃ en aguas subterráneas bajo condiciones aeróbicas es $< 2 \text{ mg l}^{-1}$ dependiendo fuertemente del tipo de suelo y la situación geológica. En EUA, los niveles naturales, no sobrepasan los 4 - 9 mg l^{-1} para N-NO₃ y 0.3 mg l^{-1} para

nitrito (USEPA, 1987). Como resultado de actividades agrícolas, la concentración de N-NO₃ puede fácilmente alcanzar cientos de miligramos por litro. Por ejemplo, 1 500 mg l⁻¹ fue la concentración encontrada en agua subterránea en un área agrícola de la India (Jacks & Sharma, 1983).

En México, estudios llevados a cabo en el estado de Yucatán, en donde fueron muestreados 12 pozos, entre abril de 1992 y marzo de 1993, observaron una variación espacial y temporal, con respecto a la época de lluvias de la zona, que va de julio a octubre. Los resultados fueron de 7.43 hasta los 156 mg l⁻¹, y éste exceso, se le atribuyó tanto al uso inmoderado de fertilizantes y pesticidas, como a los desechos humanos y animales, debido a la falta de drenaje (Pacheco, 2001).

En Baja California, en la zona del Arroyo San Carlos en el Valle de Maneadero, municipio de Ensenada, se detectaron valores naturales de N-NO₃ < 1 mg l⁻¹, debido a que es un área de recarga con baja actividad agrícola. Por su parte, se encontró una zona de enriquecimiento de NO₃ con la mayoría de los valores superando el máximo permisible, alcanzando valores de hasta 34 y 20 mg l⁻¹ en otoño del 2001, y primavera del 2002, respectivamente. En Maneadero, dos de los cinco pozos que proveen agua a la ciudad de Ensenada para uso domestico, superaron ligeramente el valor permisible por las leyes mexicanas, para uso y consumo humano (Daesslé *et al.*, 2005).

Daesslé *et al.* (2001-2002), estudiaron las propiedades hidrogeoquímicas del acuífero del Valle de Guadalupe, ubicado al noreste de Ensenada en Baja California, el cual provee el agua riego para vitivinícolas importantes de la región, además de ser una de las fuentes que abastecen a la ciudad de Ensenada. Los estudios detectaron niveles de As en tres pozos, de aproximadamente 10µg l⁻¹, asociado a una falla geológica; además de

algunos pozos con concentraciones de hasta 26 mg l⁻¹ de NO₃, 70 µg l⁻¹ de Se y 18 µg l⁻¹ Mo asociados al uso de fertilizantes (Daesslé *et al.*, 2006).

En la región que comprende el presente estudio, existen áreas importantes de cultivo, las cuales utilizan fertilizantes ricos en nitrógeno, por lo que es muy probable que el exceso de éste, se encuentre infiltrándose al subsuelo, y contaminando cuerpos de agua subterráneos. Por ello es de suma importancia cuantificar esta especie nitrogenada.

3. HIPÓTESIS

El agua subterránea para uso humano de las comunidades rurales del municipio de Ensenada, presenta características de calidad distintas, con base en: (1) la ubicación de los acuíferos, (2) el entorno geológico y (3) las actividades humanas que se realizan. Dichas diferencias se pueden caracterizar mediante el estudio de iones mayores (Ca, Mg, Na, Cl, SO₄ y HCO₃), algunos metales (Fe, Mn, Cu, Zn), así como mediante el estudio de potenciales contaminantes en la región como son As, F, y NO₃.

4. OBJETIVO

Determinar las propiedades hidrogeoquímicas y calidad del agua que se surte a las comunidades rurales en el municipio de Ensenada, Baja California. Con especial énfasis en potenciales contaminantes como As, F, y NO₃.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Área de Estudio

5.1.1 Ubicación de los sitios de colecta de muestras

Se recolectó agua subterránea en 26 pozos de extracción de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE), considerados importantes y representativos del agua con que se abastecen las comunidades rurales del municipio de Ensenada (Tabla II y Figura 1). El municipio de Ensenada se encuentra localizado entre las siguientes coordenadas geográficas: al Norte $32^{\circ} 21'$ latitud norte, al Sur $28^{\circ} 00'$ latitud norte, al Oeste $112^{\circ} 47'$ longitud Este y al Oeste $116^{\circ} 53'$ longitud oeste; colinda al Norte con los municipios de Playas de Rosarito, Tijuana, Tecate y Mexicali, al Oeste con el Océano Pacífico, al Este con el municipio de Mexicali y el Golfo de California y al Sur con el Estado de Baja California Sur.

Tabla II Sitios de colecta de agua subterránea en pozos de CESPE.

Pozo	Latitud Norte	Longitud Oeste	Acuífero
1 Aguaje Vargas	28° 06' 26"	115° 20' 11"	Isla de Cedros
2 Aguaje No.1	28° 08' 37"	115° 13' 46"	Isla de Cedros
3 Aguaje Infantería Marina	28° 06' 08"	115° 11' 15"	Isla de Cedros
4 Ejido Nuevo Rosarito	28° 38' 05"	114° 01' 04"	Nuevo Rosarito
5 José María Morelos	28° 17' 40"	114° 01' 56"	Villa Jesús María
6 Villa Jesús María	28° 16' 58"	113° 59' 57"	Villa Jesús María
7 Poblado Punta Prieta	28° 55' 32"	114° 09' 36"	La bachata-Sta. Rosalita
8 Bahía de Los Ángeles	29° 00' 21"	113° 45' 00"	Bahía de Los Ángeles
9 Cataviña	29° 44' 30"	114° 43' 00"	Punta Canoas-San José
10 Ejido Nuevo Uruapan	30° 04' 36"	115° 41' 28"	El Rosario
11 El Rosario	30° 03' 00"	115° 44' 00"	El Rosario
12 Col. Los Duarte	30° 02' 26"	115° 44' 04"	El Rosario
13 El Rosario de Abajo	30° 03' 45"	115° 43' 30"	El Rosario
14 Valle Tranquilo	30° 17' 13"	115° 48' 09"	San Simón
15 Nuevo Odisea	30° 23' 26"	115° 52' 07"	San Simón
16 Francisco Villa	30° 28' 00"	115° 51' 12"	San Simón
17 Pozo UABC-CESPE	30° 39' 13"	115° 57' 26"	San Quintín
18 El Papalote	30° 29' 10"	115° 54' 56"	San Quintín
19 Raúl Sánchez Díaz	30° 30' 25"	115° 56' 00"	San Quintín
20 Ej. Nuevo Baja California	30° 30' 57"	115° 53' 30"	San Quintín
21 Ejido Nuevo Mexicali	30° 32' 41"	115° 55' 20"	San Quintín
22 Padre Kino	30° 39' 24"	115° 58' 07"	San Quintín
23 Rancho Santa Fe	30° 40' 46"	115° 58' 12"	San Quintín
24 Col. Luis D. Colosio	30° 35' 39"	115° 57' 47"	San Quintín
25 Maneadero CESPE 2	31° 45' 26"	116° 35' 10"	Maneadero
26 Maneadero CESPE (3)	31° 45' 23"	116° 34' 22"	Maneadero

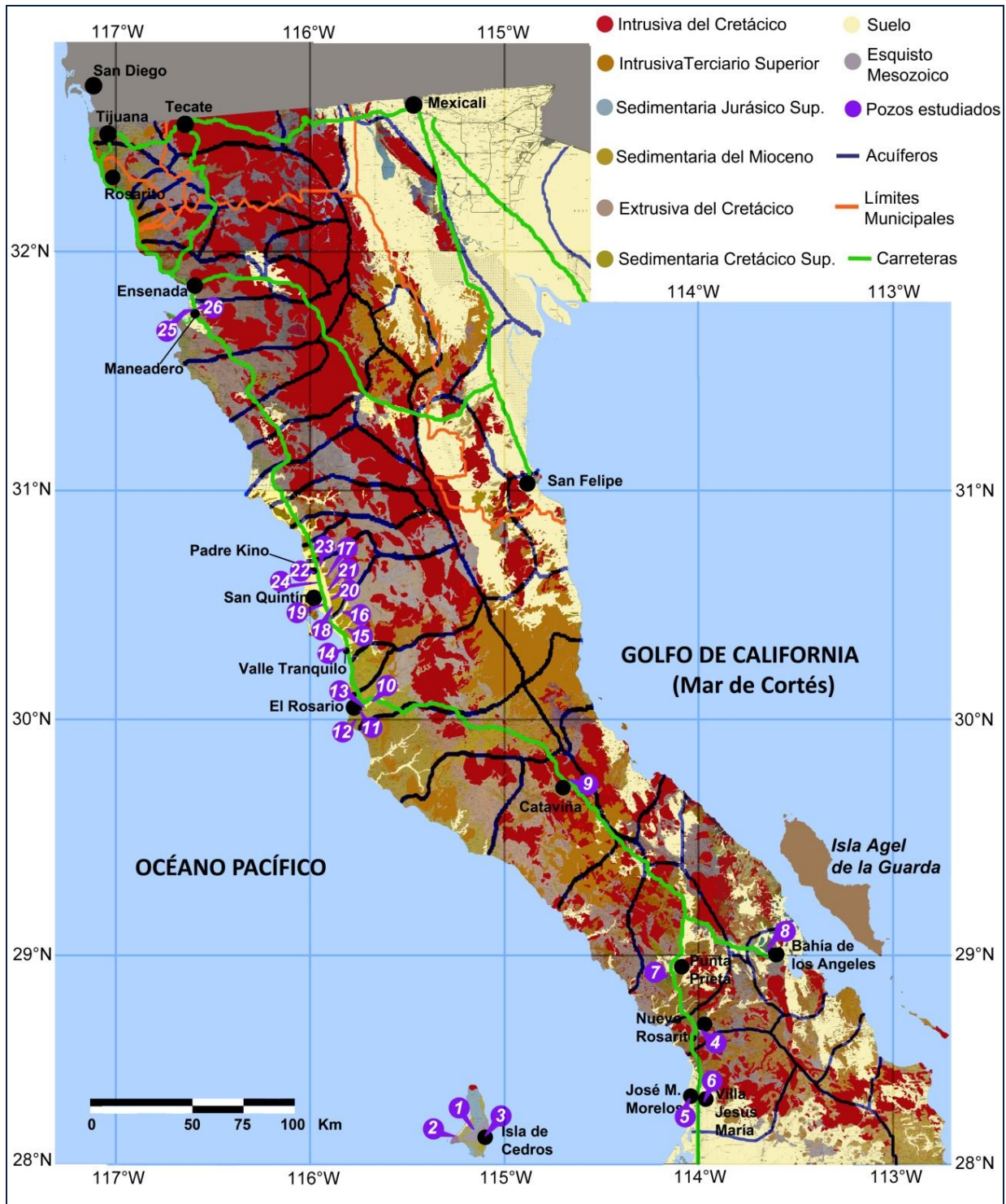


Figura 1 Ubicación de los pozos muestreados, geología del Estado, los acuíferos en los que éste se divide, y los límites de cada municipio. Modificación a partir de Cartas geológicas 1:250000 del INEGI.

5.1.2 Hidrografía

En el municipio de Ensenada no hay ríos permanentes, sólo se cuenta con arroyos con escurrimientos intermitentes de aguas; cuando el volumen pluvial llega a ser considerable en invierno o verano. Los arroyos más importantes en el municipio son: San Fernando, Los Mártires, La Bocana, La Hervidora, Santo Domingo, Huatamote, Grande, Paraíso, San Pedro, San Simón, Punta Prieta, Santo Tomás. El municipio de Ensenada, sólo cuenta con tres cuerpos de agua superficiales: Laguna Escondida, la presa Emilio López Zamora, alimentada por el arroyo de Valle Verde y La Lagunita, ubicado al norte de la base aérea militar del Ciprés, cuya importancia es de carácter ecológico (CNA, 2003).

5.1.3 Clima

Fundamentalmente existen dos tipos genéricos de climas en el Municipio de Ensenada: (1) templados húmedos que se presentan en las partes altas de las sierras y (2) seco que se localiza en el resto del municipio. Ambos climas se caracterizan por fuertes oscilaciones térmicas y pluviométricas. Además, se tienen registrados 6 subtipos de climas, prevaleciendo el clima muy seco semicálido (Bwh), que se manifiesta en el 43.54 % de la superficie del territorio municipal, siguiéndole el clima seco templado (BSk), existente en el 24.25 % del territorio, en tercer lugar el clima muy seco templado (BWk) que se manifiesta en el 18.94 % del municipio incluyendo la zona de la ciudad de Ensenada. El resto de la superficie se distribuye en clima muy seco muy cálido, semifrío subhúmedo con lluvias en invierno, con el 7.08 %, 3.54 % y 2.65 % de la superficie del municipio, respectivamente. En el Municipio de Ensenada, la principal característica en lo que a clima se refiere es que las lluvias se presentan en invierno y no en verano como sucede en el resto de país.

La diversidad del clima está regida en gran medida por la ocurrencia de vientos frescos que penetran al continente con dirección noreste, los cuales son moderadamente cargados de humedad, de tal forma que no producen lluvias abundantes excepto en zonas en donde la temperatura media anual es relativamente baja (<12 °C), mismas que se encuentran en alturas mayores a los 1 500 msnm, particularmente en las sierras de San Pedro Mártir y Juárez. Estos factores dan origen a zonas de climas templados o semifríos, ambos de carácter subhúmedo.

5.1.4 Precipitación, temperatura y evaporación

Como ya se señaló, las lluvias son escasas en la mayor parte de la región. La media regional es de 132 mm. Las mayores precipitaciones se presentan en el norte (300 mm) de la península, y se incrementan conforme se asciende de la costa a la sierra.

En la Subregión Baja California, las precipitaciones mayores ocurren en los meses de diciembre a marzo, siendo la máxima de 38 mm en enero y marzo. Las menores precipitaciones ocurren en los meses de mayo a octubre, siendo la mínima de 1 mm en los meses de junio y julio.

En relación a la evaporación potencial media anual, la más alta se presenta en la estación meteorológica El Barril, en 1982 (2 870 mm), y la más baja en El Ciprés en 1978 (1 279 mm) anuales. La temperatura media anual en Baja California varía entre los 6 hasta los 22 °C (CNA, 2003).

5.1.5 Acuífero Maneadero

El Valle de Maneadero es una subcuenca hidrológica que tiene una extensión de 1 975 km². Delimita al norte por una terraza fluvial que lo separa del Valle de Ensenada, al oriente por

la sierra de Juárez, al sur por la falla geológica de Agua Blanca y al poniente por el Estero Punta Banda. La cuenca de Maneadero está formada por materiales del Cuaternario, principalmente de sedimentos fluviales y marinos como gravas, arenas y arcillas. Mientras que la base del acuífero está formada por rocas ígneas intrusivas, extrusivas, metamórficas, complejos volcánicos, rocas sedimentarias de origen marino del Cretácico correspondiente a la Formación Rosario, las cuales no son permeables y permiten la acumulación de agua (CNA, 1999).

5.1.6 Acuífero San Quintín

La cuenca hidrológica del Valle San Quintín tiene una superficie de 971 km². Limita al norte con la Cuenca Vicente Guerrero, al sur y al este con la cuenca San Simón y al oeste con el Océano Pacífico. Tiene una precipitación media anual de 195 mm (Figura 1).

Los centros de población más importantes del valle son: Col. Lázaro Cárdenas, San Quintín, Leandro Valle y Ejido El Papalote (CNA, 2002).

De la superficie total del valle, el 82.5 % está ocupada por una unidad fisiográfica de fuerte pendiente, formando sierras escarpadas. En la porción occidental existe una amplia planicie costera, de la cual 170 Km², corresponden a la zona del acuífero del Valle de San Quintín, que presenta una antigua terraza marina emergida en el Pleistoceno. Sobre esta antigua terraza se depositaron grandes espesores de materiales granulares recientes no consolidados. Las formaciones acuíferas de este valle se encuentran, tanto en depósitos aluviales recientes, como en conglomerados Cretácicos, del grupo Rosario de origen marino.

Los materiales permeables están constituidos por gravas, arenas, limos, y en menor proporción por capas de arcilla intercalada; estos materiales conforman un acuífero de alta

permeabilidad, con espesores variables que van de 25 a 225 m. El basamento del acuífero lo constituyen depósitos arcillosos de origen marino.

A lo largo de la línea de costa se tiene material arcilloso así como rocas volcánicas extrusivas, por lo que el contacto franco entre el mar y el acuífero está limitado a ciertas extensiones. Al norte y sur está delimitado por depósitos arcillosos impermeables que separan los valles Vicente Guerrero y San Simón (CNA, 1997).

5.1.7 Acuífero San Simón

La cuenca del Valle San Simón tiene una superficie de 1 927 km². Limita al Norte con las cuencas de Colonia Vicente Guerrero y San Quintín, al Sur con las cuencas El Socorro y el Rosario, al Este con la cuenca de Valle Chico-San Pedro Mártir y al Oeste con el Océano Pacífico (Figura 1).

El Valle de San Simón se localiza en las llanuras costeras del Océano Pacífico, que en un tiempo estuvieron cubiertas por un mar poco profundo.

La base del acuífero presenta discontinuidades que van de 30 a 120 m de profundidad, con una superficie conocida de 75 km². Es considerado como un acuífero costero libre de alta permeabilidad, constituido de materiales fluviales compuestos de cantos rodados, gravas y arenas, que se localizan sobre el cauce del arroyo San Simón y en su área de influencia existen materiales aluviales como limos, arenas y material arcilloso, que forman la planicie localizada en la margen izquierda y al sur del arroyo San Simón. Estos son importantes porque ahí se localizan grandes volúmenes de agua subterránea.

De acuerdo con datos de la CNA, en la zona se cuenta con capacidad para extraer 2 900 lps, equivalente a 54.3 Mm³ anuales. El 95% del agua del agua es para uso agrícola y el 5 % para usos público urbano, domestico y pecuario.

En 1994 la salinidad del acuífero varió entre 400-15 000 mg l⁻¹ de SDT, los valores mayores se localizan cercanos a la costa y los menores en el Cañón de San Simón a la entrada del Valle (CNA, 1998).

En el año de 2004 se observó una profundidad del nivel freático de 1.25 m como valor mínimo, un máximo de 41 m y un promedio de 15.86 m, lo cual refleja un abatimiento en todo el sistema acuífero con profundidades mayores del nivel freático. Con respecto a la evolución de los niveles freáticos se obtuvo un abatimiento medio de 2.28 m y una extracción total de 13.34 Mm³ con una diferencia negativa de 5.69 Mm³, lo cual es un reflejo del exceso de extracciones del sistema acuífero del Valle de San Simón (Beltrán, 2004).

5.1.8 Acuífero el Rosario

El Valle del Rosario se encuentra al centro del Estado, limitando al Sur con El Divisadero y Punta Baja, El Aguajito al noreste, los llanos de San Agustín al sureste y al oeste la costa del Pacífico (Figura 1).

La precipitación media anual en el valle es de alrededor de 100 mm. Las temperaturas medias son: 15.8°C como mínima en el NW del Rosario, y la máxima promedio es de 20.4°C al NE del Rosario. La evaporación potencial tiene una oscilación de 1193.4 a 2532 mm anuales.

Esta zona está constituida por rocas ígneas y sedimentarias. Aflorando en la región de interés, se encuentra la formación Rosario del Cretácico Superior, Post-Batolítica que se halla también a lo largo de la costa del Pacífico; consiste en lentes gruesos de conglomerados, areniscas y lutitas, areniscas con capas delgadas de madera carbonizada y

capas de arcilla color castaño oscuro, con un espesor de más de 750 m. Las lutitas y areniscas afloran en los flancos de los arroyos.

Imer (1961) dividió la Formación Rosario en 4 partes: Bocana Roja, constituida por conglomerados derivados de rocas volcánicas principalmente; Punta Baja, rocas sedimentarias marinas; El Gallo, areniscas y conglomerados continentales y El Rosario, constituido por areniscas y lutitas depositadas en un ambiente marino.

Las formaciones recientes, del Cuaternario, están constituidas por acarreo de las corrientes actuales, ocupando la parte baja de los valles, formando el relleno de sus cauces. Tienen una gran importancia pues constituyen las formaciones con porosidad y permeabilidad suficientes para constituir acuíferos.

También se encuentran sedimentos marinos de edad Cuaternaria que se presentan formando pequeñas terrazas marinas (Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A., 1981).

5.1.9 Acuífero Bahía de Los Ángeles

La cuenca denominada Bahía de los Ángeles tiene una superficie de 607.76 Km² (Figura 1).

Esta es una de las zonas de lluvias más escasas en la Península de Baja California, con sólo 64.9 mm anuales de precipitación media durante el período 1954-1972. La temperatura media anual es de 23°C, la máxima de 31°C ocurriendo en general en los meses de julio y agosto y la mínima de 16.2°C que se presenta en los meses de enero y febrero. La evaporación media anual en esta zona es de 2 127.7 mm.

El valle de origen tectónico se encuentra bordeado en su flanco occidental por rocas ígneas intrusivas y metamórficas impermeables y en su flanco oriental por rocas extrusivas volcánicas de iguales condiciones de permeabilidad.

Durante el Pleistoceno, los movimientos epirogénicos que sufrió la Península, ocasionaron en la zona la invasión del mar en varias ocasiones sobre la entonces cuenca en formación, originando al retirarse el mar, la formación de salinas que fueron reselladas posteriormente por los depósitos de aluvión. Debido a las condiciones de formación de la cuenca descritas anteriormente, los pozos y norias perforadas en el valle, cuentan con alto contenido de sales (Macías, 1974).

5.1.10 Acuífero La Bachata-Santa Rosalita

El Poblado Punta Prieta, población localizada en la parte poniente de un valle, en el que destaca como arroyo principal el arroyo Punta Prieta, las fronteras de este valle son: al este los cerros colorados, y al oeste la Sierra de Colombia. (Figura 1).

En la zona, las rocas más antiguas (esquistos) afloran en los Cerros Colorados, sobre las que estratigráficamente se encuentran rocas volcano-sedimentarias (Formación Alisitos); conglomerados terrígenos rellenan el valle y arenas en los cauces de los arroyos.

La estructura geológica de plegamiento se puede observar en la Sierra la Colombia, cuyo rumbo general es NNW-SSE, pliegues compuestos por alternancias de rocas volcánicas riolíticas y calizas Cretácicas.

Los niveles piezométricos se encontraron de la siguiente forma: Poblado Punta Prieta 20 m, La Bachata 12 m y un pozo hacia el poniente del Parador Punta Prieta 63 m, estimándose que el nivel estático tiene una pendiente hacia el Sur de 0.6% (CESPE, 1988).

5.1.11 Acuífero Nuevo Rosarito

La cuenca Nuevo Rosarito-El Tomatal es drenada por los arroyos Rosarito, La Trinidad, El Salinito, San Javier y El Tomatal que conducen sus aguas al Océano Pacífico (Figura 1).

El principal arroyo que drena la zona se conoce como Rosarito, es de tipo intermitente y tiene su origen en la Sierra de San Borja alcanzando un desarrollo del orden de 50 Km desde su nacimiento hasta el área de interés.

Las principales rocas que afloran en la región son de tipo sedimentario, representadas predominantemente por depósitos aluviales del Cuaternario, cuyo espesor probablemente sea del orden de 100 metros, así como sedimentos de origen fluvial (conglomerados) del Terciario inferior, cuyo espesor se desconoce.

Subyaciendo a los depósitos sedimentarios probablemente se encuentran rocas metamórficas (prebatolíticas) representadas principalmente por esquistos, o bien algún apófisis de gabro que haya intrusionado a dichas rocas prebatolíticas.

Existen también afloramientos de rocas ígneas extrusivas (basaltos) del Plioceno (Beltrán, 1976).

5.1.12 Acuífero Villa de Jesús María

El área muestra algunas variaciones en clima debido al contraste del relieve topográfico que conforman sus diversas altitudes, que atiende a las serranías y planicies aluviales que la caracterizan, siendo su temperatura media anual de 19°C. Los meses más calurosos registran temperaturas de 46° a 49°C y en los meses más fríos temperaturas de 2.5° a -5°C. El índice de precipitación media anual para estas zonas varía entre 75 y 164 mm.

En el Valle Jesús María corren los arroyos Los Cuernos del Venado, Minas de Bonet y Paraíso que a su vez recibe los arroyos El León, La Rinconada, La Jaula, Agua del Tule y el Quemado.

El valle en su porción suroccidental (Figura 1), se encuentra compuesto tanto de material aluvial, como de grandes lunares cubiertos por materiales eólicos y lagunares; en esta localidad se asientan los terrenos ejidales José María Morelos y Pavón.

Las unidades de roca que afloran en el área varían en edad del Mesozoico inferior al reciente. La base de la secuencia Mesozoica está representada por una unidad metasedimentaria, sobre la cual se encuentra discordantemente la formación Alisitos con sus miembros volcánicos y volcano-sedimentarios de edad Cretácico inferior, habiendo también intrusiones batolíticas del Cretácico medio. Sobreyace a toda la secuencia anterior con discordancia litológica y angular, depósitos de rocas marinas y continentales que varían en edad del Paleoceno al Mioceno. El Mioceno está representado por una secuencia volcánica en la que predominan las ignimbritas y los derrames ácidos con aparición de muy escasas andesitas. El Plioceno está formado por extravasaciones basálticas por fisura, así como la formación de conos aislados. También durante el Plioceno se formaron grandes abanicos aluviales que coronan la secuencia de rocas del área de estudio (InGeo,1980).

5.1.13 Isla de Cedros y Cataviña

Debido a que no se encontró en bibliografía información alguna, se recurrió a la interpretación de la carta geológica H11-12 del INEGI para Isla de Cedros, y a la carta geológica Punta San Antonio H11-9 para describir la geología en la que se encuentra el pozo en Cataviña ambas cartas con una escala de 1:250000.

La isla se encuentra ubicada entre las coordenadas 28° 22' 38" y 28° 01' 46" de latitud Norte, y 115° 09' 30" y 115° 21' 32" de longitud Oeste. La punta norte está compuesta roca ígnea intrusiva del Cretácico. A partir de la punta norte, hacia el centro existe roca sedimentaria compuesta por lutitas y areniscas del Jurásico superior. El noreste

está compuesto por conglomerados del período Terciario superior mientras que el oeste presenta un suelo aluvial del Cuaternario. Yendo hacia el sur, la parte este y central de la isla se componen de esquistos metamórficos del Mesozoico; y la parte oeste central hacia el sur está compuesta de arenisca del Cretácico superior. La punta oeste está compuesta por roca metasedimentaria del Triásico. La punta suroeste del mismo modo que la parte norte presenta lutita arenisca. Y hacia el lado sureste se encuentra arenisca y toba ácida, rocas volcano-sedimentarias del período Terciario superior.

El pozo de Cataviña se encuentra sobre tonalita del Cretácico, pero muy cercano a éste, existen basalto del Terciario superior y conglomerado del Mioceno. Ligeramente más alejado existen areniscas y conglomerados del Cuaternario (Figura 1).

5.2 Metodología

Se tomaron 26 muestras de agua de los diferentes pozos escogidos previamente, por ser los pertenecientes a CESPE, lo que implica que son públicos, abastecen a las comunidades y, en teoría, debiesen ser los más limpios. Las muestras fueron conservadas en hielo durante los trabajos de campo en envases totalmente llenos, para evitar la interacción con el aire.

Para cada pozo se llevó a cabo lo siguiente:

Se analizaron SDT y pH con la sonda multiparámetros YSI-6600, utilizando el conductímetro y potenciómetro previamente calibrados. La alcalinidad se midió mediante titulación con HCl.

Se tomaron las muestras en botellas de polietileno de 1 l previamente descontaminadas con agua desionizada y ácido nítrico grado óptima; de ahí se tomaron submuestras para los diferentes análisis. En una botella de 50 ml se colectó agua filtrada para el estudio de nitratos.

En botellas de polietileno de 50 ml, previamente lavadas con jabón micro, HCl al 5% y posteriormente HNO₃ grado óptima al 5%, se dispuso de agua después de un filtrado con filtro *whatmann* GF/F de 4 micrómetros de malla. Una de las botellas de 50 ml con muestra fue acidificada con HNO₃ al 1%, para el posterior análisis de cationes y As.

De las muestras acidificadas se llevó a cabo la medición de Na, Mg, K y Ca mediante el uso de un espectrofotómetro de absorción atómica *Thermo* serie *Soolar S*. El Na y Mg se midieron por medio de absorción, usando la mezcla de aire y acetileno para la combustión, el K se midió por emisión usando la misma mezcla de gases. Finalmente el Ca fue leído por absorción pero usando una mezcla de gases Oxido-nitroso con acetileno.

El As fue acidificado con HCl al 1%, la muestra fue preparada con una solución de yoduro de potasio y ácido ascórbico, se leyó en el espectrofotómetro *Soolar* serie *S* mediante generación de hidruros.

Los metales Fe, Mn, Cu y Zn se analizaron mediante ICP-OES (Walsh, 1997).

Las muestras filtradas y no acidificadas se utilizaron para el estudio de los aniones, midiendo el SO₄ por el método turbidimétrico (Clesceri *et al.*, 1998) y el Cl por medio de titulación con AgNO₃. El F fue analizado mediante un espectrofotómetro UV-visible en la longitud de onda de 560 nm utilizando el SPADNS de zirconio como reactivo. El análisis de nutrientes se realizó con un autoanizador de nutrientes de flujo segmentado *SKALAR SanPlus*. La concentración del anión bicarbonato fue determinada a partir de la medición de alcalinidad, mediante la ecuación

$$HCO_3^- (mg\ l^{-1}) = \frac{\text{Alcalinidad (mg l}^{-1}\ CaCO_3)}{\left(1 + \frac{2 \cdot 10^{-10.3}}{10^{-pH}}\right) \cdot 50} * 61 \text{ (Deutsch, 1997).}$$

Cada uno de los análisis se llevó a cabo por triplicado. De estas tres lecturas, se calculó un promedio, el cual fue tomado como el dato representativo para ese análisis en su respectiva muestra. Para la calibración del equipo se emplearon estándares multielementales: ICP MultiTraceMetal 3 que contenían Ca, Na, Mg, K Al, Ti, Fe, Ba y el Primary Safe Drinking Water Act Standard # 1 que contenía As, Cd, Cr, Pb Se y Ag.

Con la finalidad de verificar que la precisión siempre fuera mejor al 10%, se intercaló cada 5 muestras la medición de un estándar, el cual también fue utilizado para la elaboración de las curvas de calibración.

6. RESULTADOS

6.1 Físicoquímicos

Los sólidos disueltos totales se presentaron por encima del límite permisible de 1 g l^{-1} , ya que el promedio fue de 2.035 g l^{-1} . Únicamente 3 muestras estuvieron dentro de lo permitido, y aún así, estuvieron muy cercanas al valor límite. Estos pozos fueron los 2 pertenecientes al acuífero de Maneadero (25,26), y el Aguaje No. 1 (2) localizado en la parte occidental de isla de Cedros. El resto de los pozos tuvieron niveles de sólidos disueltos altos, con valores de hasta 7.35 g l^{-1} como es el caso del pozo El Papalote en el acuífero San Quintín (Tabla III).

El pH promedio de 7.25 fue ligeramente básico, comparado al agua de lluvia que es ligeramente ácida, esto debido a que la subterránea ya estuvo en contacto con las rocas y al entrar en equilibrio con éstas, disuelve minerales, provocando así el aumento de pH.

La alcalinidad tuvo un promedio de 250 mg l^{-1} calculada como CaCO_3 . Únicamente el pozo ubicado en Bahía de los Ángeles se mostró muy por encima de este valor, con 510

mg l⁻¹, pudiendo deberse al tipo de roca en que se encuentra confinada en este acuífero. Por su parte la dureza fue superior al límite permisible de 500 mg l⁻¹ en casi la mitad de los pozos, incluyendo los del acuífero San Simón, más del 50 % de los de San Quintín, además de uno en Villa Jesús María, Colonia Los Duarte, en el Rosario y el Aguaje Vargas en Isla de Cedros (Tabla III).

6.2 Nutrientes

Los nutrientes estudiados fueron nitrógeno (N-NO₃, N-NH₄), fósforo (P-PO₄) y sílice (Si-H₄SiO₄), de los cuáles el de mayor importancia para este trabajo fue el N-NO₃ por su toxicidad. Para esta variable se encontraron únicamente dos pozos por arriba del límite permitido de 10 mg l⁻¹. Estos fueron el pozo Francisco Villa en el acuífero San Simón y El Papalote, en San Quintín con concentraciones de 16.2 mg l⁻¹ y 20.3 mg l⁻¹ respectivamente.

El N-NH₄ se encontró con valores inferiores al límite permitido de 1 mg l⁻¹, con una media de 0.071 mg l⁻¹, y un valor máximo de 0.35 mg l⁻¹ en Francisco Villa. El P-PO₄ tampoco presentó altas concentraciones que pudieran indicar contaminación. Con una media de 0.078 mg l⁻¹ y los valores más altos de 0.37 mg l⁻¹ en Cataviña y 0.23 mg l⁻¹ en Rancho Santa Fe. Finalmente el Si-H₄SiO₄ presentó una concentración promedio de 13.1 mg l⁻¹, con los valores más altos en Nuevo Rosarito, Villa Jesús María y Bahía de los Ángeles (Tabla III).

Tabla III Parámetros fisicoquímicos y nutrientes obtenidos en las muestras estudiadas.

No	Pozo	T °C	Conductividad siemens	SDT g l ⁻¹	pH	Alcalinidad CaCO ₃	Dureza mg l ⁻¹	Tipo de Agua	N-NO ₃ mg l ⁻¹	N-NH ₄ mg l ⁻¹	P-PO ₄ mg l ⁻¹	Si-H ₄ SiO ₄ mg l ⁻¹
1	Aguaje Vargas	19.8	1.87	1.23	7.19	235	587	Mg Ca Cl HCO ₃	0.3	0.02	0.01	15.4
2	Aguaje No.1	22.8	1.47	0.97	7.07	173	325	Mg Ca Cl HCO ₃	0.3	0.01	n.d.*	14.6
3	Aguaje Infantería Marina	30.2	2.08	1.38	7.30	212	494	Mg Ca Na Cl HCO ₃	0.1	0.17	0.04	9.9
4	Ejido Nuevo Rosarito	23.5	1.70	1.12	7.29	301	203	Na Cl HCO ₃	0.2	0.01	0.01	33.5
5	José María Morelos	23.2	3.14	2.07	7.19	196	586	Na Mg Ca Cl	0.4	0.06	0.01	17.1
6	Villa Jesús María	24.1	1.83	1.21	7.22	264	272	Na Mg Cl HCO ₃	1.8	0.18	n.d.*	24.9
7	Poblado Punta Prieta	25.3	4.03	2.66	7.09	257	423	Na Ca Cl	0.1	0.02	0.18	18.3
8	Bahía de Los Ángeles	23.8	3.65	2.41	7.33	510	111	Na Cl HCO ₃	0.1	0.02	0.01	33.5
9	Cataviña	21.9	1.90	1.26	7.48	304	264	Na Ca Cl HCO ₃	0.3	0.06	0.37	23.0
10	Ejido Nuevo Uruapan	20.9	1.99	1.31	7.09	207	451	Ca Na Cl HCO ₃ SO ₄	0.2	0.01	0.08	14.3
11	El Rosario	20.4	2.19	1.44	7.07	172	484	Ca Na Cl	0.9	0.13	0.21	15.8
12	Col. Los Duarte	19.3	2.92	1.93	7.30	210	578	Ca Na Cl	-	-	-	-
13	El Rosario de Abajo	20.3	2.93	1.93	7.06	222	654	Ca Na Cl	3.1	0.22	0.01	10.2
14	Valle Tranquilo	15.7	4.58	3.02	7.31	232	879	Na Ca Cl	0.6	0.03	0.08	6.6
15	Nuevo Odisea	20.7	5.62	3.71	7.03	262	1142	Na Ca Cl	0.3	0.03	0.10	9.8
16	Francisco Villa	20.6	2.46	1.63	7.30	207	640	Na Ca Cl	16.2	0.35	0.13	12.6
17	Pozo UABC-CESPE	21.9	3.40	2.25	7.15	217	743	Ca Na Mg Cl	1.5	0.05	0.04	16.8
18	El Papalote	22.0	11.14	7.35	7.02	266	1895	Na Ca Cl SO ₄	20.3	0.12	0.07	15.4
19	Raúl Sánchez Díaz	22.7	3.33	2.22	7.29	280	579	Na Ca Mg Cl HCO ₃	2.5	0.03	0.09	13.7
20	Ej. Nvo. Baja California	23.7	1.97	1.30	7.31	278	262	Na Cl HCO ₃	2.6	0.03	0.09	12.3
21	Ejido Nuevo Mexicali	22.2	2.45	1.62	7.35	219	495	Ca Na Cl HCO ₃	2.8	0.06	0.09	15.4
22	Padre Kino	22.2	4.81	3.17	7.23	267	1006	Na Ca Cl	6.8	0.07	0.08	16.0
23	Rancho Santa Fe	20.4	3.82	2.52	7.42	313	649	Na Ca Cl HCO ₃	0.3	0.04	0.23	14.3
24	Col. Luis D. Colosio	25.3	2.12	1.40	7.33	210	368	Na Ca Cl HCO ₃	0.6	0.08	0.03	14.0
25	Maneadero CESPE 2	22.0	1.31	0.91	7.4	230	197	Na Cl HCO ₃	2.9	0.04	0.04	-
26	Maneadero CESPE 3	20.3	1.30	0.89	7.7	256	192	Na Cl HCO ₃	4.0	0.01	0.03	-
Límite Permisible				1	6.5- 8.5		500		10			

* No detectado.

6.3 Iones mayores

De los aniones, el cloro, tiene valores superiores al límite permisible de 250 mg l^{-1} , con un promedio de 784 mg l^{-1} . La concentración más baja fue de 310 mg l^{-1} en Maneadero 3, mientras que el Papalote muestra el valor más alto con 3360 mg l^{-1} .

El HCO_3^- tiene una media de 304 mg l^{-1} . Bahía de los Ángeles con 620 mg l^{-1} es el más alto, al igual que en la alcalinidad debido a las rocas carbonatadas que allí se encuentran. Para SO_4 existe un límite permisible de 400 mg l^{-1} , el cuál fue rebasado por los pozos Nuevo Odisea y el Papalote con valores de 438 mg l^{-1} y 1249 mg l^{-1} respectivamente.

De los cationes el Na fue el de mayor abundancia, teniendo los pozos del acuífero San Simón concentraciones superiores al límite permitido de 200 mg l^{-1} , al igual que los pozos Punta Prieta y Bahía de los Ángeles, y del acuífero San Quintín: Padre Kino, Santa Fe y el Papalote, el último de estos con el valor más alto de $1\ 048 \text{ mg l}^{-1}$.

El Ca tuvo un promedio de 136 mg l^{-1} , el valor más alto de Ca, al igual que el de los demás iones, exceptuando el K, se obtuvo en el Papalote, pozo del acuífero San Quintín, con 466 mg l^{-1} . El Mg tuvo una media de 52.8 mg l^{-1} , y el K una de 5 mg l^{-1} con el valor más alto en el pozo de Bahía de los Ángeles.

Se realizaron correlaciones entre variables y los iones fueron los que mostraron las correlaciones más significativas. Todos los iones mayores excepto el HCO_3^- y el K, muestran una importante relación con los sólidos disueltos totales. El Cl, SO_4 y Ca mostraron una correlación importante entre ellos. Asimismo el Na y Mg también mostraron una correlación significativa con los iones antes mencionados, aunque en menor proporción (Tabla IV).

6.4 F

El F tuvo 4 pozos que superaron el límite permisible de 1.5 g l^{-1} que fueron Punta Prieta, Bahía de los Ángeles, Raúl Sanchez Díaz y Maneadero 2, este último con el valor más alto (2.5 g l^{-1}). El 30 % de los pozos tienen un valor superior a 1 mg l^{-1} .

6.5 As

Tres pozos superaron el valor recomendado por la OMS, de $10 \mu\text{g l}^{-1}$. Estos fueron Maneadero 2, Bahía de los Ángeles y Ejido Nuevo Rosarito (Tabla IV). Sin embargo todos cumplen con la norma Mexicana de $25 \mu\text{g l}^{-1}$.

6.6 Metales

Los metales analizados fueron Fe, Mn, Zn y Cu. Estos se encontraron por debajo del límite máximo permisible establecido por la norma para cada uno de ellos, exceptuando el Mn cuya concentración en dos pozos fue superior a los $150 \mu\text{g l}^{-1}$. Los pozos que superaron este valor fueron: José María Morelos ($507 \mu\text{g l}^{-1}$) y Valle Tranquilo ($266.4 \mu\text{g l}^{-1}$) (Tabla IV).

Tabla IV Valores de Iones mayores, metales, As y F.

No.	Pozo	HCO ₃ mg l ⁻¹	Cl mg l ⁻¹	SO ₄ mg l ⁻¹	Ca mg l ⁻¹	Na mg l ⁻¹	Mg mg l ⁻¹	K mg l ⁻¹	Fe µg l ⁻¹	Mn µg l ⁻¹	Zn µg l ⁻¹	Cu µg l ⁻¹	As µg l ⁻¹	F mg l ⁻¹
1	Aguaje Vargas	286	460	65	90	64	88	2.3	<1.3	3.5	4.8	<2	1.654	0.5
2	Aguaje No.1	211	320	101	56	46	45	2.4	<1.3	0.8	5.7	<2	1.643	0.5
3	Aguaje Infantería Marina	258	495	121	91	81	65	1.5	<1.3	0.4	0.9	<2	1.590	0.6
4	Ejido Nuevo Rosarito	367	360	52	45	146	22	4.9	7.1	1.8	1.2	<2	12.24	1.3
5	José María Morelos	239	1000	20	111	181	75	7.8	<1.3	507.0	4.1	<2	2.204	0.4
6	Villa Jesús María	322	378	59	53	118	34	4.9	37.0	15.0	4.6	<2	5.081	0.6
7	Poblado Punta Prieta	313	1175	183	140	417	18	1.9	<1.3	1.0	7.8	<2	3.439	1.7
8	Bahía de Los Ángeles	620	725	253	28	455	10	25.6	165.4	55.0	8.2	<2	14.10	2.1
9	Cataviña	369	395	63	73	123	20	6.3	<1.3	30.7	1.0	<2	3.362	0.7
10	Ejido Nuevo Uruapan	252	430	157	128	85	32	3.2	<1.3	0.7	11.8	<2	2.647	0.8
11	El Rosario	209	520	152	138	92	34	3.1	<1.3	1.0	7.3	<2	2.594	0.6
12	Col. Los Duarte	255	755	204	164	179	41	3.6	<1.3	3.9	368.9	<2	1.967	1.0
13	El Rosario de Abajo	270	755	170	183	139	48	4.1	<1.3	44.9	26.6	<2	3.614	0.7
14	Valle Tranquilo	282	1375	230	237	313	70	5.6	<1.3	266.4	3.2	<2	1.764	0.3
15	Nuevo Odisea	319	1444	438	296	411	98	3.6	<1.3	1.7	100.2	<2	2.057	0.8
16	Francisco Villa	252	475	224	189	499	41	2.1	<1.3	0.5	4.4	2.8	1.872	0.6
17	Pozo UABC-CESPE	265	943	193	166	172	80	4.2	<1.3	16.8	5.3	<2	9.302	0.2
18	El Papalote	324	3360	1249	466	1048	178	6.7	<1.3	10.6	6.2	<2	2.248	1.3
19	Raúl Sánchez Díaz	341	690	182	130	165	62	9.5	<1.3	13.6	13.2	7.7	1.938	2.5
20	Ej. Nvo. Baja California	338	370	115	59	153	28	5.5	<1.3	12.5	5.6	<2	1.923	0.6
21	Ejido Nuevo Mexicali	266	590	166	129	134	42	5.1	<1.3	<0.3	12.0	2.1	1.862	0.6
22	Padre Kino	325	1345	359	235	327	102	4.1	19.9	19.3	993.0	4.3	2.131	0.8
23	Rancho Santa Fe	381	935	132	143	277	71	4.6	<1.3	67.6	2.1	<2	1.614	1.2
24	Col. Luis D. Colosio	255	465	122	98	117	30	5.5	<1.3	1.4	62.6	2.1	1.809	0.6
25	Maneadero 2	282	320	76	46	197	20	4	-	1.95	122.69	37.47	16.84	2.5
26	Maneadero 3 (Pueblo)	312	310	76	44	171	20	2	-	1.58	99.65	7.89	2.16	1.4
Límite Permisible			250	400		200			300	150	5000	2000	25	1.5
Límite sugerido por OMS										400		2000	10	1.5

6.7 Tipos de Agua

La composición de iones mayores en el agua es utilizada para clasificar las aguas subterráneas según los aniones y cationes dominantes. Las aguas aquí estudiadas fueron clasificadas gráficamente en el diagrama de Piper (Figura 2). En él es posible observar que la mayoría de las aguas pertenecen al tipo $\text{Ca}^{2+}\text{Na}^+\text{Cl}^-$. Las aguas del acuífero de Maneadero, Nuevo Rosarito y Bahía de los Ángeles son del tipo $\text{Na}^+\text{HCO}_3^-\text{Cl}^-$, mientras que los pozos (6, 9 y 10) poseen una mezcla completa de $\text{Ca}^{2+}\text{Na}^+\text{HCO}_3^-\text{Cl}^-$. Finalmente, las aguas de Isla de Cedros tienen una composición principalmente conformada por iones $\text{Ca}^{2+}\text{Cl}^-$.

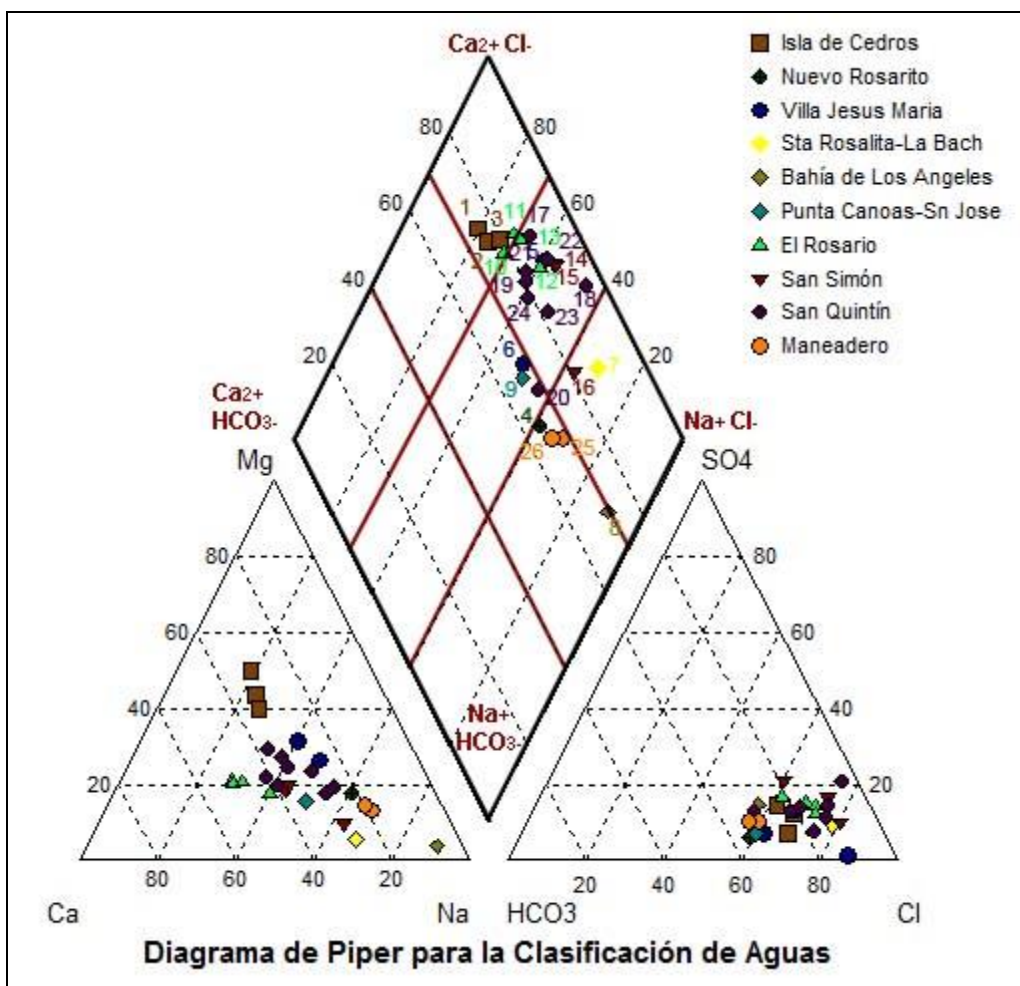


Figura 2. Clasificación de aguas mediante porcentaje de composición iónica.

Tabla V. Coeficientes de correlación entre variables estudiadas. Los coeficientes marcados en negritas son significativos en un intervalo de confianza del 90%.

	<i>pH</i>	<i>Cond</i>	<i>SDT</i>	<i>NO₃</i>	<i>NH₄</i>	<i>P</i>	<i>HCO₃⁻</i>	<i>Cl</i>	<i>SO₄</i>
<i>pH</i>	1	-0.36	-0.414	-0.109	-0.14	0.116	0.289	-0.425	-0.398
<i>Cond</i>		1	1	0.633	-8.3 E-3	-5.1 E-2	0.18	0.989	0.943
<i>SDT</i>			1	0.601	3.9E-2	6.7E-3	0.181	0.989	0.94
<i>NO₃</i>				1	0.545	-3.0E-2	-6.8E-2	0.588	0.74
<i>NH₄</i>					1	5.6E-2	-0.265	2.2E-2	0.129
<i>P</i>						1	2.3E-2	-1.7E-2	-3.4E-2
<i>HCO₃</i>							1	9.0E-2	0.118
<i>Cl</i>								1	0.921
<i>SO₄</i>									1

	Ca	Na	Mg	K	Mn	Zn	F	As
<i>pH</i>	-0.492	-0.232	-0.438	0.114	6.7 E-5	4.3E-2	0.253	0.135
<i>Cond</i>	0.893	0.902	0.8	0.147	7.0 E-2	0.166	0.257	-7.8E-2
<i>SDT</i>	0.9	0.888	0.814	0.177	9.6E-2	0.146	9.7E-2	-0.156
<i>NO₃</i>	0.645	0.764	0.525	-7.3E-2	-0.148	0.161	5.9E-2	-0.139
<i>NH₄</i>	0.232	0.192	8.0E-2	-0.197	-8.6E-2	-4.1E-2	-0.274	-0.185
<i>P</i>	5.4E-2	2.2E-2	-0.137	-0.16	-0.149	-6.1E-2	-5.4E-2	-0.28
<i>HCO₃</i>	-0.159	0.315	-0.142	0.823	-8.0E-2	-4.0E-3	0.516	0.468
<i>Cl</i>	0.902	0.861	0.831	9.9E.2	0.162	0.153	4.1E-2	-0.172
<i>SO₄</i>	0.87	0.888	0.766	0.12	-0.127	0.13	0.11	-0.124
<i>Ca</i>	1	0.755	0.833	-0.141	4.6E-2	0.213	-0.138	-0.35
<i>Na</i>		1	0.589	0.254	1.2E-3	6.5E-2	0.254	2.3E-2
<i>Mg</i>			1	-0.12	0.153	0.216	-0.198	-0.335
<i>K</i>				1	0.204	-9.1E-2	0.414	0.45
<i>Mn</i>					1	-9.9E-2	-0.243	-0.108
<i>Zn</i>						1	1.8E-2	-7.4E-2
<i>F</i>							1	0.517
<i>As</i>								1

7. DISCUSIONES

7.1 Caracterización de tipos de agua

La mayoría de los pozos estudiados se encontraron en zonas muy cercanas a la costa. A excepción de los pozos Cataviña (9) y Punta Prieta (7) (Figura 1), la frontera de los acuíferos con la línea de costa puede permitir la intrusión de agua salina, principalmente

cuando la recarga natural del acuífero es menor a la explotación de éste. En esta situación se encuentran la mayoría de los acuíferos estudiados debido a la escasa precipitación y el aumento en el requerimiento del recurso hídrico por el incremento demográfico y por la demanda agrícola de cada región. En particular la explotación para riego de cultivos es otra situación en la que se encuentran los acuíferos de San Quintín, San Simón y en menor grado el acuífero de El Rosario. Esto se ve reflejado en la alta concentración de SDT (Daesslé, 2005). En la tabla IV se observa que a lo largo del Pacífico, los pozos al sur tienen las concentraciones más bajas de cationes y aniones, mientras que los acuíferos costeros en valles agrícolas del norte tienen los valores más altos. Esto se ve confirmado en la tabla V que muestra las correlaciones, en particular la correlación entre Cl, SO₄, Ca, Na y Mg con SDT.

Mediante las relaciones de carga y concentración de los diferentes iones se puede describir el tipo de agua al que pertenecen las muestras estudiadas (Deutsch, 1997), (Figura 2). Existen diferencias significativas en la composición de los diferentes acuíferos. El agua en Isla de Cedros del tipo Na⁺Cl⁻ y en cambio Bahía de los Ángeles es de tipo de Na⁺Cl⁻HCO₃⁻. Aunque estas dos localidades representan los dos extremos en el rango de composición de los acuíferos estudiados, en general la zona tiene una mayor dominancia por Cl Na.

Los metales traza estudiados no mostraron concentraciones por encima de la normatividad mexicana, por lo que al parecer no representan algún riesgo para seres humanos en caso de uso o consumo de estas aguas. Sin embargo, la dureza del agua sí fue superior al límite permitido, rebasándolo en casi el 50% de los pozos estudiados, aunque con valores altos se da una correlación negativa con enfermedades cardiovasculares (Kousa 2006). Por tal motivo, se propone llevar a cabo ablandamiento del agua previo a su uso en

las casas con el fin de evitar el depósito del Ca y Mg en las tuberías y evitar riesgos a la salud.

7.2 F

La fluorita (CaF_2) es un mineral común de baja solubilidad presente tanto en rocas ígneas como sedimentarias. Los fluoruros están asociados comúnmente con actividad volcánica y gases fumarólicos. Por ello las aguas termales, especialmente aquellas de pH alto son también ricas en fluoruros (Edmunds, 1996).

En estudios anteriores (Kim, 2005) se demostró que altos niveles de F^- pueden asociarse a zonas de fallas, o también a la interacción entre el agua y las rocas de granito durante tiempos de residencia prolongados.

En el presente estudio se encontraron 4 pozos que superan el valor permitido de 1.5 mg l^{-1} de F por la norma oficial mexicana. Los pozos Maneadero 2 y Raúl Sanchez Díaz al norte del área de estudio, y Punta Prieta y Bahía de los Ángeles en el sur.

Estos pozos tuvieron NaCl o NaCa como tipos de agua (Figura 2). Pero al no haber encontrado una correlación significativa con estos elementos, se cree que diversos procesos son los responsables de las altas concentraciones. En el sur la presencia de F se puede explicar por la interacción agua-roca, debido a que cuando esto ocurre, el Na es liberado, quedando en suspensión, mientras que el Ca se deposita, lo que se aprecia en la mayor concentración obtenida de Na con respecto al Ca (Tabla IV), además el largo tiempo de residencia de las aguas en contacto con las rocas de granito (Chae, 2007), y la diferente litología con rocas basálticas y estratos evaporíticos en el acuífero de Bahía de Los Ángeles. En el norte, Vidal en 1981, reportó la alta intrusión de agua geotermal debido a la

falla de Punta Banda. Este fenómeno explica en el pozo de Maneadero, la alta concentración de F.

En San Luis Potosí concentraciones de entre 1.5 y 4 mg l⁻¹ se consideran originadas por flujos termales en rocas volcánicas (Valenzuela, 2006). Para el pozo de Raúl Sánchez Díaz en el acuífero de San Quintín no se han reportado aguas termales, pero si existe la presencia de rocas volcánicas, de donde pudiera proceder el F.

7.3 N-NO₃⁻

Las altas concentraciones de nitratos se pueden relacionar al uso excesivo de fertilizantes, debido a la escasa presencia de NH₄ y PO₄, lo cual podría ser un indicio de contaminación por material orgánico. Únicamente 2 pozos superan el valor permitido por la norma oficial mexicana de 10 mg l⁻¹. Dado que la muestra con altas concentraciones de nitratos en San Quintín también tiene los más altos valores de SDT, es de esperarse que el agua de mar se encuentre diluyendo una señal alta de la contaminación por fertilizantes. El alto uso de fertilizantes está contaminando seriamente bastantes acuíferos alrededor del mundo como sucede en Yucatán (Pacheco, 2001), Baja California (Daesslé, 2005) y algunas regiones de Estados Unidos (Hamilton, 1995). Aunque sólo 2 valores superaron el límite permisible, 9 de 13 pozos pertenecientes a los acuíferos Maneadero, San Quintín y San Simón, todos estos agrícolas, mostraron un valor superior a 1.5mg l⁻¹. Si se considera la dilución debida a la intrusión salina, es razonable pensar que hay entradas considerables de N-NO₃ a los acuíferos, y es por esto que los agricultores deberían llevar a cabo estudios de requerimiento específico de nutrientes (Ibendahl, 2007), con el fin de un ahorro económico a la hora de sembrar, y a su vez el cuidado del agua que ellos mismos están empleando.

7.4 As

El As es un elemento que se asocia a una diversidad de minerales, especialmente a los sulfuros de Fe y a rocas ígneas intrusivas como las que forman el batolito peninsular y rocas extrusivas; el As puede encontrarse en zonas de actividad geotermal. El mineral más abundante de As es la arsenopirita (FeAsS), la cual se forma bajo condiciones de alta temperatura en la corteza terrestre (Smedley, 2002).

Los pozos que tuvieron valores considerables de As en el presente trabajo fueron el 4, 8 y 25 con 12.2, 14.1 y 16.8 $\mu\text{g l}^{-1}$ respectivamente, presentando estos mismos valores elevados de Fe. Al igual que con el F es posible relacionar los valores en Maneadero a intrusión geotermal, mientras que en Bahía de los Ángeles y Nuevo Rosarito la causa podría ser por el tipo de roca confinante así como la alta evaporación que existe en la zona, lo que incrementaría la concentración de estos elementos disueltos (Figura 1).

Aunque todos los pozos estuvieron por debajo del límite permisible en agua para consumo humano en México (25 $\mu\text{g l}^{-1}$), si se comparan con el valor sugerido por la OMS y el valor adoptado en EUA por la US-EPA de 10 $\mu\text{g l}^{-1}$, tres pozos exceden dichos niveles, lo que podría representar potencialmente un riesgo a la salud por la ingesta de este elemento.

8. CONCLUSIONES

Se encontró que el tipo de agua predominante en los 26 pozos estudiados de la región rural del estado de Baja California es Ca-Na-Cl. En contraste, el tipo de agua en Bahía de Los Ángeles es de tipo Na-HCO₃-Cl.

Con excepción de tres pozos, todos presentaron una elevada concentración de sólidos disueltos totales lo que corrobora que, dado que la mayoría son acuíferos costeros, se presenta el fenómeno de intrusión salina, como resultado de la sobreexplotación a la que se encuentran sujetos.

Dos pozos pertenecientes a los acuíferos sobre los cuales existe un amplio uso agrícola superaron el valor permisible de N-NO₃ (10 mg l⁻¹) con 16.2 y 20.3 mg l⁻¹.

El As se mantuvo por debajo del límite permisible por la norma mexicana, sin embargo los pozos Nuevo Rosarito, Maneadero 2 y Bahía de los Ángeles mostraron valores superiores al recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 10 µg l⁻¹ lo que podría representar un riesgo a la salud de la población que consuma agua directamente de esos pozos.

Cuatro pozos superaron el valor permitido de F de 1.5 mg l⁻¹ (Bahía de los Ángeles, Punta Prieta, Raúl Sánchez Díaz y Maneadero 2). En Maneadero se sugiere que los altos valores de F se asocian a actividad geotermal, mientras en Bahía de los Ángeles la dominancia del catión Na sobre Ca permite pensar que se pueda deber a la interacción agua-roca durante un periodo prolongado.

9. BIBLIOGRAFÍA

Asad M, Dinar A, (2006) El Rol de la política del agua en México. Banco Mundial, En breve (95)
4 pp.

Ahmed K, Bhattacharya P, Hasan M, Akhter S, Alam S, Bhuyian M, Imam M, Khan A, Sracek O,
(2004) Arsenic enrichment in groundwater of the alluvial aquifers in Bangladesh: an
overview, Applied Geochemistry 19: 181-200.

Beltran L, (2004) Balance de los Recursos Hidráulicos Subterráneos del Acuífero BC-46, Valle de
San Simón. Ensenada, B.C. 23 pp.

Beltrán L, (1976) Informe Geohidrológico del Ejido Nuevo Rosarito, Municipio de Ensenada, Baja
California. Ensenada, Baja California.

Carrillo (2003) Agua Subterránea. En P. M., Agua Subterránea. Mexico D.F.: Ed. Limusa. 274-318
pp.

CESPE (1988) Informe del estudio geofísico realizado en las proximidades al poblado Punta
Prieta, Ejido Ganadero Juarez, Delegación Bahía de Los Ángeles, Municipio de Ensenada,
Baja California. Ensenada, B.C. 17 pp.

Chae GT, Yun ST, Mayer B, Kim KH, Kim SY, Kwon JS, Kim K, Koh YK (2007) Fluorine geochemistry in bedrock groundwater of South Korea. *Science of the Total Environment* 385: 272–283.

CNA (1997) Estudio Técnico justificativo de la zona geohidrológica del "valle de San Quintín". Mexicali. B.C. 14 pp.

CNA (1998) Resumen Ejecutivo Acuífero BC-46 San Simón. Mexicali, B.C. 6 pp.

CNA (1999) Estudio de simulación hidrodinámica del Acuífero de Maneadero, B. C. Subdirección Técnica-Gerencia aguas subterráneas.

CNA (2002) Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero San Quintín, estado de Baja California. Mexico. 17 pp.

CNA (2003) Programa Hidráulico Nacional 2002-2006, Region I, Península de Baja California. Mexico. 195 pp.

Daesslé LW, Mendoza LG, Camacho VF, Rozier W, Morton O, Van Dorst L, Lugo K, Quintanilla A, Rodríguez A, (2006) The hydrogeochemistry of a heavily used aquifer in the Mexican wine producing Guadalupe Valley, Baja California, Mexico. *Environmental Geology* 51: 151-159.

Daesslé LW, Sánchez E, Camacho V, Mendoza L, Carriquiry J, Macias V, Castro P, (2005) Geochemical evolution of groundwater in the Maneadero coastal aquifer during a dry year in Baja California, Mexico. *Hydrogeology Journal* 13: 584-595.

Deutsch WJ, (1997) *Groundwater Geochemistry: fundamentals and applications to contamination*. New York: Lewis Publishers. 221 pp.

Diario Oficial de la Federación (2000) Modificación a la Norma NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Secretaría de Salud (primera sección) 48-54.

Díaz-Barriga F, Navarro-Quezada A, Grijalva MI, Grimaldo M, Loyola-Rodriguez JP, Ortiz MD, (1997) Endemic fluorosis in Mexico. *Fluoride*, **30**(4): 233–239.

Edmunds WM, Smedley PL, (1996) Groundwater geochemistry and health: an overview. En: Appleton, Fuge and McCall [Eds] *Environmental Geochemistry and Health*. Geological Society Special Publication, 113: 91-105.

Fawell J, K. B. (2006) *Fluoride in Drinking Water*. London UK: IWA Publishing. 134 pp.

- Fordyce FM, Vrana K, Zhovinsky E, Povoroznuk V, Toth G, Hope BC, Iljinsky U, Baker J (2007) A health risk assessment for fluoride in Central Europe. *Environmental Geochemistry and Health* 29: 83-102.
- Grey D., S. C. (2006) Agua para el Crecimiento y Desarrollo. Mexico: IV Foro Mundial del Agua. Banco Mundial. 50 pp.
- Grimaldo M, Borja-Aburto VH, Ramírez AL, Ponce M, Rosas M, Díaz-Barriga F, (1995) Endemic fluorosis in San Luis Potosi, Mexico. *Environmental Research*, 68: 25–30.
- Hamilton P, Helsel D, (1995) Effects of agriculture on ground-water quality in five regions of the United States. *Ground Water* 33: 217–225.
- Hem JD, (1989) Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. Water Supply Paper 2254, 3rd edition, US Geological Survey, Washington, D.C., 263 pp.
- Hopenhayn-Rich C, Biggs ML, Fuchs A, Bergoglio R, Tello E, Nicolli H, Smith AH, (1996) Bladder-cancer mortality associated with arsenic in drinking water in Argentina. *Epidemiol.* 7: 117–124.
- Ibendahl P, Fleming R, (2007) Controlling aquifer nitrogen levels when fertilizing crops: A study of groundwater contamination and denitrification. *Ecological Modelling* 205: 507–514.

INEGI. (s.f.). INEGI. Recuperado el 11 de Septiembre de 2007, de <http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/bc/rh.cfm>

InGeo (1980) Servicios de Prospección y levantamientos geológicos y geofísicos en la zona sur de Baja California Norte. Mexicali 23pp.

Jacks G, Sharma VP, (1983) Nitrogen circulation and nitrate in ground water in an agricultural catchment in southern India. *Environmental Geology* 5(2):61–64.

Jenkins D, V. (2004) *Química del Agua*. Mexico D.F.: Editorial Limusa. 408 pp.

Kim K, Jeong GY (2005) Factors influencing natural occurrence of fluoride-rich groundwaters: a case study in the southeastern part of the Korean Peninsula. *Chemosphere* 58: 1399–1408.

Kousa A, Havulinna A, Moltchanova E, Taskinen O, Nikkarinen M, Eriksson J, Karvonen M (2006) Calcium:Magnesium ratio in local groundwater and incidence of acute myocardial infarction among males in rural Finland. *Environmental Health Perspectives* 114:730–734.

Lozano-Montemayor VM. (1992) Fluorosis dental en Ensenada, Baja California. *Rev Asoc Dent Mex.* 49: 340–344.

Lugo K, (2007) Modelación de la dispersión de contaminantes en el acuífero costero de Maneadero, Baja California, México. Tesis de Maestría en Oceanografía Costera Instituto de Investigaciones Oceanológicas – Facultad de Ciencias Marinas, Ensenada B. C., 90 pp.

Macías HL, (1974) Apreciación preliminar de las características hidrogeológicas del valle Bahía de los Ángeles en el estado de Baja California. Mexico. 13 pp.

Méndez M, Armienta M, (2003) Arsenic phase distribution in Zimapán mine tailings, México. Geofísica Internacional 42 (001): 131-140.

Murray JJ, (1986) Appropriate Use of Fluorides for Human Health, World Health Organization, Geneva.

Pacheco J, Marín L, Cabrera A, Steinich B, Escolero O, (2001) Nitrate temporal and spatial patterns in 12 water-supply wells, Yucatan, Mexico. Environmental Geology 40 (6) 708-715.

Price M, (2003) Agua Subterránea. México D.F.: Editorial Limusa.

Robinson B, Outred H, Brooks R, Kirkman J, (1995) The distribution and fate of arsenic in the Waikato River System, North Island, New Zealand. Chem. Spec. Bioavail. 7: 89–96.

- Rodríguez R, Ramos J, Armienta A, (2004) Groundwater arsenic variations: the role of local geology and rainfall. *Applied Geochemistry* 19: 245-250.
- Roychowdhury T, Tokunaga H, Uchino T, Ando M, (2005) Effect of arsenic-contaminated irrigation water on agricultural land soil and plants in West Bengal, India. *Chemosphere* 58: 799–810.
- Smedley PL, K. D, (2002) A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry* 17: 517–568.
- Soto-Roja EA, Ureñas-Cirett JL, Martínez-Mier E, (2004) A review of the prevalence of dental fluorosis in Mexico. *Revista Panamericana de Salud Publica*, 15: 9-17.
- Sprent JI, (1987) *The ecology of the nitrogen cycle*. Cambridge University Press. Great Britain. 151 pp.
- Técnicas Modernas de Ingeniería, S.A. (1981) *Estudio Geohidrológico sujeto a revisión de la Zona de El Rosario, Estado de Baja California Norte*. Mexicali BC. 31 pp.
- Valenzuela-Vásquez L, Ramírez-Hernández J, Reyes-López J, Sol-Uribe A and Lázaro-Mancilla O (2006) The origin of fluoride in groundwater supply to Hermosillo City, Sonora, México *Environmental Geology* 51: 17–27.

Vidal VMV, Vidal FV, Isaacs JD (1981) Coastal submarine hydrothermal activity off northern Baja California. 2. Evolutionary history and isotope geochemistry. *Journal of Geophysical Research* 86(B10): 9451-9468.

Wakida FT, Lerner DN, (2005) Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study. *Water Research* 39: 3-16.

Walsh J N, (1997) *Inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry*, Longman, London.

Yokoyama T, Takahashi Y, Tarutani T, (1993) Simultaneous determination of arsenic and arsenious acids in geothermal water. *Chem. Geol.* 103: 103–111.