



UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División De Desarrollo Sustentable

**Descripción de variables físico-químicas
en sistemas acuáticos cársticos de la isla
de Cozumel, en un ciclo anual 2007-2008**

TESIS
Que para obtener el grado de
LICENCIADA EN MANEJO DE RECURSOS
NATURALES

Presenta
Luz de Lourdes Aurora Coronado Álvarez

Director de Tesis
Dra. Martha Angélica Gutiérrez Aguirre

Cozumel, Q. Roo, Agosto de 2009.

059775

UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO

División de Desarrollo Sustentable



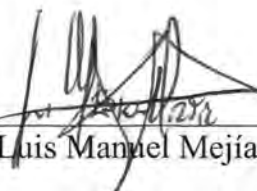
Tesis elaborada bajo la supervisión del comité de Tesis del programa de Licenciatura y aprobada como requisito para obtener el grado de:

LICENCIADO(A) EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES

COMITÉ DE TESIS

Director: 
Dra. Martha Angélica Gutiérrez Aguirre

Asesor: 
Dr. Adrián Cervantes Martínez

Asesor: 
Dr. Luis Manuel Mejía Ortiz

Cozumel, Quintana Roo, México, Agosto de 2009

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Martha A. Gutiérrez-Aguirre y al Dr. Adrián Cervantes-Martínez, por el apoyo, la paciencia y los consejos brindados durante los últimos cuatro años en mi formación académica. Muchas gracias por ser parte de mi carrera y del logro más importante de ésta como es su culminación. Son unas excelentes personas en toda la extensión de la palabra.

A mi familia, especialmente a mi mamá, por alentarme día a día a dar siempre lo mejor de mí en cada proyecto emprendido; por confiar y creer que lograría cada meta que me he propuesto y por su ayuda incondicional, le dedico este trabajo y cada objetivo alcanzado. Gracias Dolores.

Al M. en C. Oscar Frausto-Martínez, por haber sido la primera persona en proporcionarme la oportunidad de crecer en el ámbito tanto académico como laboral, gracias por todo, nunca lo olvidaré.

Al M. en C. Thomas Ihl, por su amabilidad y ayuda siempre que fue necesario, gracias por ser tan cordial y aceptar ser parte del comité para este trabajo.

A mis amigos que estuvieron presentes tanto en las fiestas como en los momentos difíciles y algunos de ellos dedicar su tiempo en los muestreos para la tesis. Gracias por su amistad, Guadalupe Chan-Quijano, Ernesto Canul-López, Aarón Canché-Canché, Coral Koh-Pasos, Verónica Prado-Aguilar y Margarita Fernández-Salgado.

Al personal administrativo de los diferentes departamentos de la Uqroo-Cozumel, por las facilidades brindadas y su gran disposición durante estos cinco años. ¡Gracias Claudia Sánchez-Contreras, Héctor Zacarías-Zagoya y Leonel Rodríguez-Soberanis por el ánimo y las consideraciones con mi personal!

A los docentes de esta Institución, exclusivamente quienes de manera amable compartieron sus conocimientos, me tuvieron paciencia, apoyaron y creyeron en mí.

A los alumnos de la Licenciatura en Manejo de Recursos Naturales de las distintas generaciones, que me ayudaron en la toma de muestras para este trabajo.

Al Programa de Jóvenes Investigadores, por la beca para la impresión de la tesis.

CONTENIDO

INDICE DE FIGURAS	5
INDICE DE TABLAS	6
RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
ANTECEDENTES	11
JUSTIFICACIÓN	14
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
OBJETIVOS	16
AREA DE ESTUDIO	17
MATERIALES Y MÉTODOS	21
RESULTADOS	
Variables ambientales	
Precipitación	25
Temperatura ambiente	25
Físico-química básica	
pH	25
Temperatura del agua	29
Oxígeno disuelto	29
Cloruros	34
Conductividad	34
Salinidad	40
Sólidos disueltos totales	40
Características de los sistemas	46
Relación entre las variables	49
DISCUSIÓN	51
CONCLUSIONES	63
LITERATURA CITADA	64
ANEXOS	75

ÍNDICE DE FIGURAS

- 1 Ubicación de los sistemas evaluados.
- 2 Esquema de las características medidas en los cuerpos de agua.
- 3A Variación temporal del promedio mensual de la precipitación y
- 3B Temperatura ambiente promedio mensual durante el ciclo anual.
- 4 Variación espacio-temporal del pH.
- 5 Variación espacio-temporal de la temperatura.
- 6 Oscilación espacial y temporal en la concentración de oxígeno.
- 7 Oscilación espacial y temporal en el contenido de cloruros.
- 8 Fluctuación espacio-temporal de la conductividad eléctrica.
- 9 Fluctuación espacio-temporal de la salinidad.
- 10 Variación espacial y temporal en el contenido de sólidos disueltos totales.
- 11 Oscilación espacio-temporal de la profundidad de los sistemas evaluados.
- 12 Dendrograma de similitud de los sistemas estudiados.
- 13 Distribución de las formaciones de calizas del Pleistoceno de la Isla de Cozumel.

ÍNDICE DE TABLAS

- 1 Coordinadas geográficas de los sistemas evaluados.
- 2 Correlación de Spearman.
- 3 Límites permisibles de elementos contenidos en el agua para uso y consumo humano de acuerdo a la NOM-127-SSA-1994.
- 4 Sistemas que sobrepasan los límites estipulados en la normatividad.

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo estudiar los sistemas acuáticos cársticos (pozos y cenotes) en Cozumel, como ventanas de aprovechamiento de agua subterránea, útiles para el cumplimiento de actividades cotidianas de la población. Éstos se hallan principalmente en zonas aledañas al área de captación de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA) de la Isla. El análisis se llevó cabo en 14 sistemas, en un ciclo anual, con colectas mensuales (de una muestra y su réplica) realizadas de noviembre 2007 a octubre 2008; donde, con una sonda multiparamétrica Hydrolab DS5X, se determinaron en campo, los siguientes parámetros físico-químicos: pH, temperatura, oxígeno disuelto, cloruros, conductividad eléctrica y salinidad. Conjuntamente, se recopiló información meteorológica de la Isla, como la precipitación y temperatura ambiente promedio mensual, la cual fue consultada en una página de Internet que cuenta con el acervo meteorológico de la Isla. Adicionalmente, se analizaron la profundidad de cada cuerpo y la distancia del suelo a la película del agua; por otro lado, se determinó la concentración de sólidos disueltos totales en el agua, siguiendo la técnica de Castillo-González. Con ello se pretendió identificar las oscilaciones espacio-temporales de dichas variables, con el propósito de generar información básica sobre el estado en el que se encuentra el recurso. Los valores obtenidos, se compararon con los límites permisibles de las Normas Oficiales Mexicanas, tal como la NOM-127-SSA-1994 (establece las características de agua para uso potable); obteniendo que el comportamiento de los sistemas Sin Barda y Chankanaab III, es diferente con respecto al resto de los cuerpos de agua, presentado los índices más elevados; no obstante, es destacable que todos los pozos y cenotes sobrepasan los estándares estipulados por lo menos en una variable. También se realizó correlación de Spearman, para identificar qué parámetros guardan una estrecha relación, obteniendo que los sólidos disueltos totales mostraron gran afinidad con la conductividad, la salinidad y los cloruros; pese a que se hallaron bajas correlaciones la probabilidad asociada es significativa en algunos casos, además de observar correspondencias inversas entre las variables. En general, el comportamiento de todos los sistemas, indica que se ven afectados por la temporada climática, ya que en secas y lluvias se registran los mayores índices, mientras que en nortes, es notorio el descenso, destacando diferencias espaciales producto de la formación del terreno. Por tanto, las fluctuaciones registradas son propias del acuífero, pero es importante considerar su vulnerabilidad con respecto a las fuentes potenciales de contaminación, esto es primordial para el manejo y conservación del recurso hídrico. **Palabras clave:** agua subterránea, cenotes, descripción físico-química, límites permisibles, pozos.

INTRODUCCIÓN

La presencia de agua en la naturaleza, en cantidad y calidad suficiente, es imprescindible para mantener el equilibrio de todos los ecosistemas. Esta aseveración debe tomarse en cuenta especialmente en el caso de los cuerpos de agua tanto superficiales como subterráneos, debido a que de éstos se extrae el agua para uso y consumo humano. Siendo dichos sistemas los directamente afectados cuando los aprovechamientos son excesivos, las descargas rebasan la capacidad de depuración natural del cuerpo de agua o la manipulación de su estructura natural no considera la prevención y mitigación de los impactos ambientales generados (Enkerlin *et al.*, 1997; Nebel y Wright, 1999).

En el caso de México, que es un país que coexiste en un ambiente multinacional, moderno, inmerso en los procesos de globalización que orientan el desarrollo sustentable de los sectores que integran su economía, el agua no es la excepción, ya que actúa como insumo básico en la mayoría de los procesos productivos y su abundancia o escasez en muchas ocasiones es determinante en la marcha de la economía y en los procesos sociales y políticos de las regiones; de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CNA), en México existen 653 acuíferos y de su calidad poco se sabe, a pesar de que constituye la fuente de abastecimiento para 75 millones de mexicanos (Anónimo, 2003).

En este contexto, la administración del agua, respaldada por la Ley de Aguas Nacionales y el Programa Nacional Hídrico, ubica a México en una posición congruente con otras legislaciones; puesto que el problema del agua (abasto, calidad, uso sustentable, entre otros), es de tal relevancia que se puede afirmar que la disponibilidad y manejo de este recurso fijarán los márgenes del desarrollo sustentable (Foster *et al.*, 2002; Anónimo, 2006). Es por ello que el gobierno en general y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a través de la Comisión Nacional del Agua (un órgano descentralizado de dicha Secretaría) en particular, afirman que es necesario conocer con precisión el comportamiento del agua y sus múltiples implicaciones (Larqué-Saavedra, 2007).

Ante esta situación, el agua para uso y consumo humano en México se halla reglamentada por leyes y normas, que establecen los parámetros con los cuales se deben cumplir, para que ésta pueda ser considerada apta para su aprovechamiento

(Anónimo, 2002). Las regulaciones en cuanto a los límites permisibles de los componentes del agua potable, están plasmadas en la NOM-127-SSA1-1994, así como por los Criterios Ecológicos de Calidad de Agua (CE-CCA-001/89).

Adicionalmente la mencionada normatividad es considerada como la base para la publicación del Instituto Nacional de Ecología (INE) y la Secretaría de medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) "Calidad de agua en los ecosistemas costeros de México" (2004).

Pero para el caso de la Península de Yucatán, la fácil degradación de la calidad del agua podría estar relacionada con las características tan particulares del suelo cárstico, debido a que éste es distinto a otro tipo de terrenos, modificando en gran medida las propiedades del agua subterránea (Quinlan, 1989; Schmitter-Soto *et al.*, 2002a). De igual forma, provoca mayor vulnerabilidad a la contaminación, puesto que el agua de la precipitación se filtre rápidamente y arrastre cualquier sustancia que se encuentre en la superficie del suelo, provocando muchas veces el deterioro en la calidad del agua de los sistemas de abastecimiento de las poblaciones (Kresic *et al.*, 1992). Ante esta situación, es urgente que se establezca una red de evaluación permanente de la calidad del agua subterránea, que permita saber cuáles son las oscilaciones básicas de parámetros físicos, químicos y biológicos, variables altamente informativas que permiten detectar posibles fuentes de contaminación y zonas contaminadas (Ralston, 2000; Marín *et al.*, 2000).

En Cozumel también dominan los suelos cársticos de la región y por ello no existen cauces de agua superficial, solo un cuerpo subterráneo de agua dulce que yace sobre las aguas marinas, de mayor densidad. En teoría, esta lente de agua dulce alcanza su máximo espesor en la zona centro-oriental de la isla (Lesser y Weide, 1988), y constituye la fuente principal de abastecimiento de agua potable. Desafortunadamente en ocasiones es, al mismo tiempo, receptora de aguas de desecho, las cuales son vertidas a mar. Provocando que el principal problema sobre el recurso hídrico sea el incremento de la contaminación del acuífero. Esta polución puede tener dos orígenes: a) antropogénico, debido a la falta de alcantarillado, las fosas sépticas mal construidas o mal diseñadas, así como fecalismo al aire libre y b) origen natural, ocasionado por el ascenso de agua salada debido a la sobreexplotación del acuífero (Anónimo, 1998).

Por tanto, el objetivo del presente trabajo es conocer el comportamiento del acuífero, a través el análisis físico-químico en pozos y cenotes de la isla, para proporciona

información básica sobre el estado en el que se encuentra el recurso; lo cual podrá dar la pauta para futuras investigaciones que proporcionen las bases científicas, proviniendo de elementos esenciales en la administración y por ende, en el buen funcionamiento del mismo (Alley, 2007; Larqué-Saavedra, 2007).

ANTECEDENTES

La evaluación de los recursos hidrológicos está definida por la Organización Meteorológica Mundial como la determinación de recursos, nivel, dependencia y calidad de los mismos basados en estudios de las posibilidades de utilización y control (Anónimo, 1991).

Asimismo, es imprescindible mencionar algunas de las propiedades de los sistemas cársticos, los cuales son resultado de la disolución de la roca caliza y dolomita, como son: a) carencia de flujo superficial permanente, b) existencia de cuerpos de agua poco profundos, c) canales subterráneos con ocurrencia de flujo rápido y d) la presencia de ojos de agua (Kacaroglu, 1999).

Las investigaciones que ayuden a la comprensión de la dinámica del acuífero son requeridas en la evaluación del recurso para administrarlo (Díaz-Arenas y Febrillet-Huertas, 1986). Por esta razón, a continuación se citan algunos estudios que abordan temas relacionados con el comportamiento del recurso en la zona.

La Península de Yucatán, es un macizo calcáreo afectado por clima tropical, considerada una planicie sin causas superficiales y por tanto únicamente con la presencia de ríos subterráneos, alimentados por el agua de lluvia que penetra rápidamente a través del terreno (Herrera-Silveira *et al.*, 1998; Batllori-Sampedro *et al.*, 2005; Marín *et al.*, 2000). Las condiciones geomorfológicas de la plataforma calcárea han favorecido la formación de rasgos fisiográficos característicos, provocando que la circulación del agua subterránea sea de forma primaria, secundaria y terciaria por las fracturas, la disolución de la roca y la porosidad (Escolero-Fuentes, 2005; Flores-Nava *et al.*, 1989).

- Debido a lo anterior en islas de origen calcáreo como es el caso de Cozumel, la única forma de recarga del acuífero es la precipitación (Cervantes-Martínez, 2007) y ésta a su vez, representa la fuente más importante de agua potable. Mientras que la presencia y distribución de los diferentes cuerpos de agua están en función de la geomorfología y geología entre otros factores (López-Chicano *et al.*, 2001).

También es preciso mencionar que el tamaño y forma de las islas tienen gran influencia sobre las dimensiones de los cuerpos de agua, por medio de los cuales se extrae dicho recurso para uso y consumo humano, teniendo una relación directamente

proporcional, es decir, a territorios pequeños corresponde cuerpos de agua de menor volumen (Díaz-Arenas y Febrillet-Huertas, 1986).

En el caso de Cozumel la CNA, la asigna como una unidad hidrogeológica, delimitada por el mismo territorio. Dicha unidad tiene una forma irregular, alargada, con longitud media de 30 km y ancho promedio de 16 Km (Anónimo, 2002).

En la Isla, los trabajos realizados con los recursos hidrológicos, se han relacionado con la evaluación de calidad de agua en pozos bajo administración municipal, verbigracia el de Wurl y colaboradores (2003), quienes evaluaron 168 de 226 pozos existentes de la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA), encontrando que los valores en cloruros (270 mg/l) en algunos casos, exceden los límites permisibles establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas (250 mg/l). Igualmente, se halló una relación directa entre cloruros y bromuros como la existente en el agua de mar. Por otro lado, exponen que la conductividad eléctrica es un parámetro que indica la intrusión de agua salina en los pozos. A lo cual sugieren medir ésta, en los pozos de producción continua y reducir el rango de bombeo en caso de alta mineralización. Por último, señalan que en la zona de mezcla entre el agua de mar y el agua dulce, la disolución de calcita puede ocurrir, la cual puede ocasionar ligeramente alta permeabilidad en el acuífero.

- Por otro lado, existen escasas investigaciones básicas realizadas en sistemas suburbanos de la isla, tal como los estudios de Cervantes-Martínez (2007a, b) y Gutiérrez-Aguirre *et al.* (2008), quienes determinaron algunos parámetros útiles para informar sobre la calidad del agua, tales como: temperatura, transparencia, oxígeno disuelto, pH, conductividad y salinidad. Las variables físicas proporcionan una idea del estado en el que encuentran los cuerpos de agua; mientras que los elementos químicos juegan un rol importante en el estudio porque a través de ellos se infiere la influencia ambiental sobre la calidad del recurso.

En otro sentido, Zack y Lara (2003) han mostrado la importancia de conocer las magnitudes básicas de los sistemas dulceacuícolas de Cozumel, estableciendo que los niveles de agua en pozos tiene un rango entre un metro sobre el nivel del mar en el centro de la isla y cerca de 0.10 metros cerca de la costa; cuya profundidad oscila entre los 3 y 5 metros debajo de la superficie de la tierra.

Las determinaciones de conductividad, salinidad y profundidad de los sistemas son fundamentales para detectar áreas de intrusión marina, la cual se considera como un factor contaminante en pozos de uso doméstico (Molina *et al.*, 2002).

Por ejemplo, una disquisición sobre la evaluación de los pozos de captación de CAPA en Cozumel, es la de Zack y Lara (2003), donde se analizaron 173 que estaban operando, los cuales se seleccionaron con respecto a la vulnerabilidad de la intrusión de agua salada y la reducción del nivel del agua en un proceso histórico. Teniendo como resultado una clasificación donde se reveló que la calidad del agua y producción pudo ser marcadamente improvisada en 29 sistemas por instalación de pozos limpiadores durante el estudio, es decir, la activación de mayor número de éstos para reducir el tiempo de bombeo de otros. De igual forma, el análisis demostró que 52 pozos debieron ser excluidos del servicio por contaminación y que la producción pudo ser incrementada en un total de 92 unidades.

Las investigaciones referidas anteriormente, son un avance dentro de la materia acerca del conocimiento del recurso hídrico; sin embargo, aún hay incógnitas que resolver, pero sobretodo, es vital que éstas sean la clave para la conservación y manejo adecuado del mismo.

JUSTIFICACIÓN

La aplicación de medidas de conservación del agua tiene impacto en la economía, en los patrones sociales y arreglos institucionales para el uso del recurso y en la naturaleza de nuestra necesidad de ella. Al llevar a cabo la evaluación físico-química del agua subterránea, existe una mayor factibilidad de entender el comportamiento y conocer los valores de los elementos que en ella se encuentran. Además, de que un inventario georreferenciado de sistemas dulceacuícolas de uso cotidiano en la isla, podría proveer de un marco de referencia para identificar los posibles cambios en éstos, así como detectar posibles influencias negativas que ocasionarían su degradación en determinada zona, verbigracia la intrusión de agua salada por el tiempo de bombeo.

En otro sentido, los pozos y cenotes son culturalmente importantes para la población a escala regional y al mismo tiempo, pueden funcionar como ventanas para la obtención de información relacionada con la físico-química básica del agua subterránea (fuente de abastecimiento) (Pacheco, 2001).

Además, un aspecto que es importante manifestar es la inexistencia de regulaciones para acuíferos o sistemas de naturaleza cárstica (Cortés-Santiago, 2006), los cuales poseen características muy peculiares que pueden cambiar las propiedades del agua que en ellos circula, sin que se trate de algún tipo de contaminación (Antigüedad, 2000). El conocimiento sobre el comportamiento del agua subterránea, creando un inventario como base para su monitoreo, de forma periódica, es una herramienta esencial para integrar la ciencia con las disposiciones de manejo de la misma. Los datos obtenidos en dicho proceso sirven como punto clave para las decisiones en la administración del recurso, cuyo valor para la población es de gran importancia, por el uso como fuente de agua para la realización de las actividades cotidianas (León-Vizcaíno, 1988; Jiménez y Marín, 2004).

En su conjunto, la información obtenida sirve como base para conocer el comportamiento natural del agua subterránea en un ciclo anual completo y saber si se halla dentro del marco regulatorio existente en esta materia; además de sentar la base para futuras investigaciones.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Por lo anterior, se plantean las siguientes preguntas: ¿Cómo es el comportamiento físico-químico básico en un ciclo anual en distintos cuerpos de agua de Cozumel? y ¿Cuál es el estado del recurso hídrico contenido en dichos sistemas de acuerdo a la NOM-127-SSA1-1994?

OBJETIVOS

Objetivo general

Describir las variables físico-químicas en sistemas acuáticos (pozos y cenotes) en Cozumel; confrontando los resultados con los estándares establecidos en la reglamentación de agua subterránea, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Permitiendo proveer a los administradores y a la población habitante del lugar, referencias útiles para la conservación del acuífero e investigaciones para su manejo y control.

Objetivos específicos

- Conocer la físico-química del agua (en muestreos mensuales en un ciclo anual), en sistemas, primordialmente de la zona centro-norte de la Isla (aledaña a los pozos de captación de CAPA).
- Determinar parámetros físico-químicos tales como: pH, temperatura, oxígeno disuelto, cloruros, conductividad eléctrica y salinidad, con una sonda multiparamétrica; asimismo, calcular los sólidos disueltos totales.
- Establecer y describir las oscilaciones en el tiempo de los cambios que presentan los parámetros medidos; adicionalmente con ayuda de correlación lineal simple, determinar la relación que probablemente guarden distintas variables durante el periodo estudiado.
- Proveer un marco de referencia mediante la generación de datos e interpretación de los mismos.
- Caracterizar los sistemas con base a la profundidad y la distancia de la superficie a la película del agua.

AREA DE ESTUDIO

Se analizaron algunos sistemas de agua dulce de la isla de Cozumel (ubicada en las coordenadas 20°30'30" Latitud Norte y 86°58'00" Longitud Oeste) (Fig. 1). La cual abarca una superficie de 473 Km², lo que corresponde al 100% del total de la unidad hidrogeológica y al 1.1% del estado de Quintana Roo (Anónimo, 2002). Algunos de los aspectos generales que enmarcan las características del área de acuerdo a Anda-Gutiérrez (2004), se citan a continuación:

Geografía física

Geología

El municipio está constituido por calizas sedimentarias. Su naturaleza cárstica impide la formación de ríos en su superficie ya que toda el agua de lluvia percola a través de fracturas y fisuras en el terreno hasta el nivel freático.

Edafología

Dentro del área se distinguen tres tipos de suelos claramente definidos: los suelos de mesetas calcáreas, que se encuentran en las partes altas; los suelos de barras costeras y playas, cubiertos de matorral costero o cocotero y por último, los suelos de cuencas cubiertas por vegetación de manglar y otras halófitas.

Suelos de mesetas calcáreas. Predominan en la vertiente Este de la isla. Éstos han sido clasificados como litosoles, cuya característica principal es su poca profundidad (0-40 cm).

Suelos de barras costeras y playas. En ellos se aprecian los cambios en la vegetación de matorral costero a zona de contacto entre el manglar y elementos de la selva subperennifolia.

Suelos de cuencas o bajos aluviales. Ocurren en su mayoría en zonas inundables, carecen de vegetación, son fangosos y poco compactos, anaeróbicos y saturados de agua salobre o con una concentración salina superior al agua de mar. Existen tres unidades de suelos: histosol, gleysol (subunidades mólico y húmico) y solonchak (subunidades mólico y gleyco).

Climatología

Cozumel presenta un clima tipo Am; cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, superiores a 40 mm en el mes más seco (García, 1973).

La oscilación diaria entre las temperaturas máximas y mínimas es muy pequeña, por lo que la temperatura media de 25.5 °C, es uniforme durante casi todos los meses del año, con excepción de la temporada de nortes, cuando las temperaturas varían cerca de 20 °C; la precipitación alcanza los 1504 mm anuales.

Hidrología

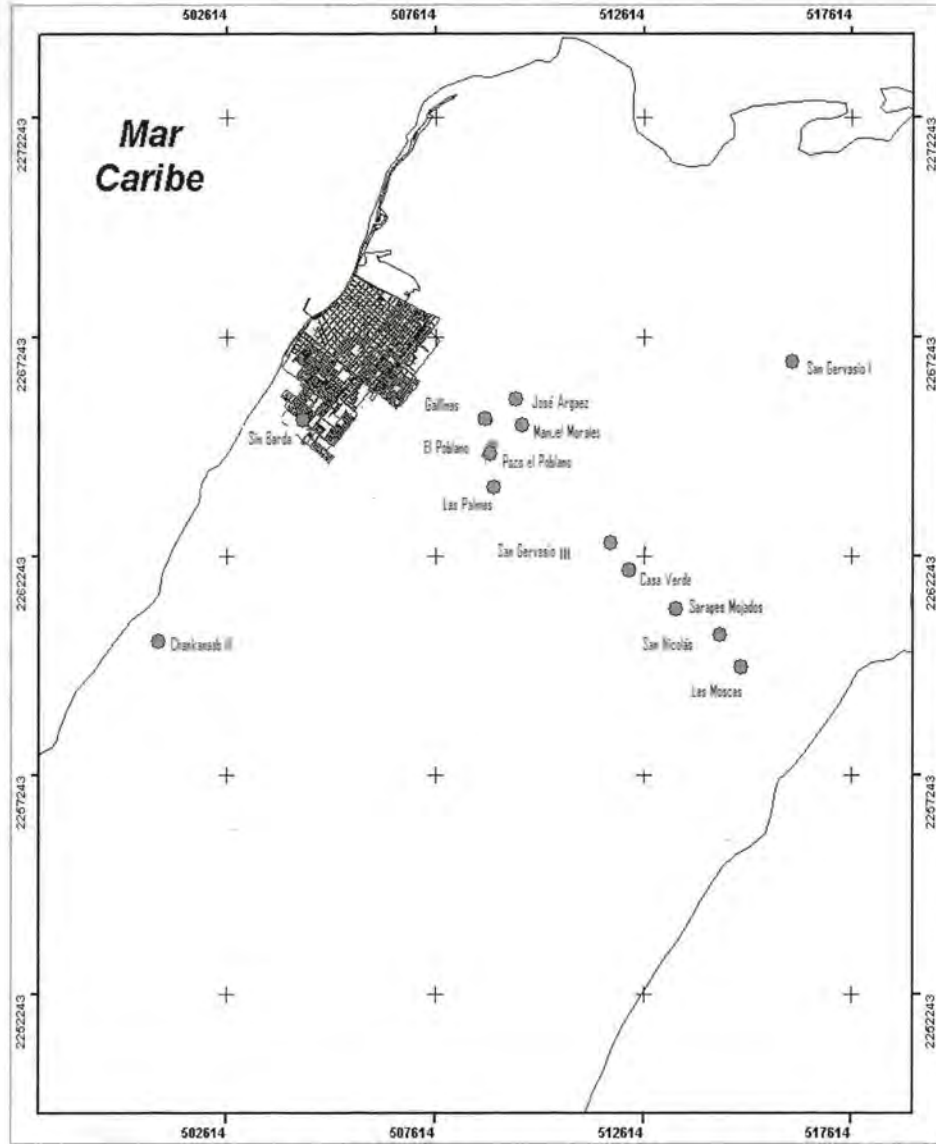
No existen cuerpos de agua superficiales y el acuífero está comprendido por dos capas, una de agua marina sobre la cual se deposita una lente de agua dulce, que constituye la reserva hídrica (Spaw, 1978).

Pozos y cenotes

Los 14 cuerpos de agua evaluados se ubican en distintos puntos de Cozumel (ver Tabla 1 y Fig. 1). Dichos sistemas, están en ranchos, ejidos y pequeñas propiedades y constituyen la fuente principal de abastecimiento de agua y se ubican dentro de la zona donde la reserva de agua dulce del acuífero es mayor (Lesser y Weidie, 1988), la cual corresponde al área administrada por la Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA). Indicio de lo anterior, es que históricamente en la región de interés, es donde ha existido el principal desarrollo de cultivos del lugar, tal como el de la piña, que en algún momento fue característico de la Isla (Cach, 2007). Asimismo, un factor más que determinó la elección de estos cuerpos de agua es que en la zona sur de Cozumel, se ha reportado mayor intrusión de agua salina (com. per., Frausto-Martínez, 2007).

Tabla 1. Coordenadas geográficas de los sistemas evaluados.

Sistema	Coordenadas Latitud Norte	Geográficas Longitud Oeste
Sin Barda	20°29.192'	86°57.299'
Chankanaab III	20°26.451'	86°59.448'
El Poblano	20°29.172'	86°54.937'
Pozo el Poblano	20°29.165'	86°54.992'
Gallinas	20°28.777'	86°54.859'
Palmas	20°27.331'	86°52.951'
Casa Verde	20°26.124'	86°51.397'
Moscas	20°26.124'	86°51.397'
San Nicolás	20°26.531	86°51.685'
Sarapes Mojados	20°26.845'	86°52.297'
San Gervasio I	20°29.901'	86°50.685'
San Gervasio III	20°27.661'	86°53.208'
Manuel Morales	20°24.067'	86°54.729'
José Argaez	20°29.443'	86°54.508'



Leyenda

- Puntos de muestra
- ▭ Traza Urbana de Cozumel
- ▭ Municipio de Cozumel

0 2,500 5,000 Metros
 Proyección: UTM Zona 16 Norte WGS 84

Fig. 1. Ubicación de los sistemas evaluados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para evaluar cada sistema, se trabajó con información recabada previamente en campo y laboratorio (colectas mensuales de noviembre 2007 a octubre 2008). El periodo de colecta incluyó un ciclo anual considerando tres temporadas climáticas: lluvias (julio a octubre), secas (marzo a junio) y nortes (noviembre a febrero) (Schmitter-Soto *et al.*, 2002b); lo que permitió percibir las oscilaciones de los parámetros medidos en función del tiempo y espacio.

Trabajo de campo

Colecta de muestras de agua para análisis de sólidos disueltos totales

Por cada sistema se tomó una muestra de agua y su réplica, a una profundidad intermedia en cada caso, conservándose en frascos de polietileno de 500 ml, etiquetados con los siguientes datos: lugar, fecha, número de muestra y recolector; guardándose en refrigeración a 4 °C hasta el momento del análisis (Castillo-González, 1998).

Características de los sistemas

Las siguientes magnitudes físicas se determinaron con un flexómetro *in situ*:

- Profundidad de la columna de agua (DC)
- Distancia a la película del agua respecto al nivel del suelo (DS-A) (Fig. 2).

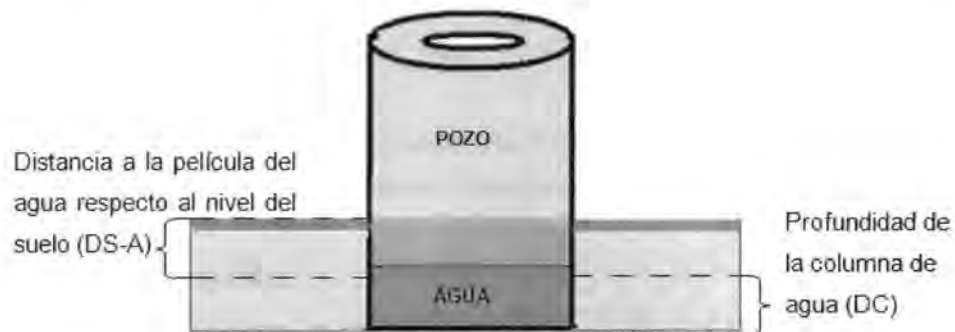


Fig. 2. Esquema de las características medidas en los cuerpos de agua

La determinación de la distancia a la película del agua respecto al nivel del suelo (DS-A), se realizó con el objeto de constatar las variaciones de la columna del agua (DC) a lo largo del ciclo analizado.

Parámetros físico-químicos

Por otro lado, también se determinaron *in situ* características físicas y químicas del agua con una sonda multiparamétrica Hydrolab modelo DS5X (calibrada de acuerdo a lo establecido en la NMX-AA-121-SCFI-2005 (Muestreo en aguas naturales epicontinentales, costeras y marinas), que computa:

- pH
- Oxígeno (O₂), mg/l
- Cloruros (Cl⁻), mg/l
- Conductividad eléctrica, $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Temperatura, °C
- Salinidad, mg/l

Las variables que se evaluaron (muestra y réplica), se registraron en hojas de campo (en la sección de Anexos, se muestra el diseño de la bitácora).

Laboratorio

Sólidos disueltos totales

Una vez colectadas las muestras de agua, la concentración de sólidos disueltos totales, se determinó en el Laboratorio de Recursos Naturales de la Universidad de Quintana Roo-Cozumel, con la técnica establecida por Castillo-González (1998), misma que coincide con el procedimiento requerido por la NMX-AA-034-SCFI-2001 (Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas).

El residuo total se determinó por gravimetría, mediante la previa evaporación de la muestra de agua a 103-105 °C por medio del siguiente procedimiento:

a) Preparación de cápsulas

Se calcinaron las cápsulas de porcelana a 550 °C dentro del horno Mufla Lindberg, durante 60 minutos. Posteriormente, se dejaron enfriar en un desecador (Pyrex, con desecante e indicador coloreado de humedad o indicador instrumental) a temperatura ambiente y se pesaron hasta peso constante con ayuda de una Balanza Analítica Adventurer OHAUS, No AR2140 ± 0.1 mg.

b) Determinación

Se homogenizó la muestra y rápidamente se determinó el volumen (25 ml) utilizando una probeta graduada, para verterla en la cápsula tarada previamente, la cual se colocó en una placa, Corning Modelo PC-420, hasta conseguir la evaporación total del agua.

Finalmente, las cápsulas se dejaron enfriar en el desecador hasta temperatura ambiente y se pesó hasta peso constante. Para evitar re-hidratación de las cápsulas se empleó sílica gel granulado dentro del desecador.

Cálculos

$$\text{Mg/L Sólidos disueltos totales} = \frac{(S-C) \times 1000}{\text{ml de muestra}}$$

Donde:

C= peso de la cápsula (mg)

S= Sólidos totales + cápsula (mg)

Recopilación de información

Además de los datos determinados en campo y laboratorio por los procedimientos mencionados anteriormente, se requirió información meteorológica, como la precipitación y temperatura ambiente (promedios mensuales); las cuales se obtuvieron a través de una página de Internet (Anónimo, 2009), que cuenta con el acervo meteorológico de la isla.

Procesamiento y análisis de datos

a) Físico-química básica

Se describieron las oscilaciones con respecto al tiempo de las variables estudiadas (pH, temperatura, oxígeno disuelto, cloruros, conductividad eléctrica, salinidad, sólidos disueltos totales, precipitación mensual promedio y temperatura ambiente) a lo largo de un ciclo anual. Es decir, se identificaron las fluctuaciones en las tres épocas climáticas, a partir de gráficos construidos en Excell de cada uno de los parámetros determinados en campo y laboratorio.

La representación gráfica se realizó con el promedio mensual de cada variable: esto permitió describir y evaluar las oscilaciones a escala temporal y espacial de los parámetros registrados en los sistemas.

Por otra parte, las determinaciones se cotejaron con las Normas Oficiales Mexicanas que reglamentan los límites permisibles para agua potable, tal como la NOM-127-SSA1-1994, con el propósito de identificar sistemas o épocas climáticas con valores superiores o cercanos a los límites, ya que se consideraron como susceptibles de contaminación.

b) Características de los sistemas

Se caracterizó a los sistemas de acuerdo a su profundidad y la distancia del suelo a la película del agua; el primer caso, es con el objetivo de saber qué tan disponible se halla el agua en estos cuerpos. Mientras que la zona donde la distancia de la superficie a la película de agua es menor, dio a conocer el área de más fácil acceso para el aprovechamiento del recurso hídrico, haciendo énfasis en el establecimiento de medidas de conservación.

Dichos datos se colocaron en una tabla, donde se señala cada sistema con sus respectivas dimensiones, en conjunto con el análisis correspondiente.

c) Relación entre variables

Con la información recabada se creó una base de datos, en el software estadístico BioStat 3.4, que permitió efectuar correlación de Spearman, puesto que los datos analizados no cumplieron con los supuestos para llevar a cabo una prueba paramétrica (correlación de Pearson) (Salinas, 2007), entre los factores físico-químicos evaluados.

Estas herramientas estadísticas son índices que miden la interdependencia entre las variables (Silva y Salinas, 2006); lo cual sirvió para establecer cuáles son los parámetros que están interrelacionados en este tipo de sistemas; además, este conocimiento pretende ser la pauta para que en futuras investigaciones se incorporen otras variables, en lugar de aquellas que guardan estrecha relación, enriqueciendo de esta manera los estudios hidrológicos.

RESULTADOS

Variables ambientales

Precipitación

El promedio mensual de precipitación correspondiente al ciclo analizado se presenta en la Fig. 3A. La mayor precipitación se registró en septiembre (460 mm) y octubre 2008 (340 mm), lo cual coincide con los meses finales de la temporada climática de lluvias. Durante nortes, en noviembre 2007, se encontró el tercer valor más alto con 220 mm. No obstante, en los restantes meses de dicha época junto con secas, el total de precipitación no rebasó los 100 mm.

Temperatura ambiente

La temperatura mínima en promedio, se registró en nortes en enero 2008 (21 °C), sin sobrepasar los 23 °C para esta época. El máximo corresponde a la temporada de lluvias en agosto 2008 con 28°C; mientras que para secas, la temperatura no presentó grandes variaciones (25-27 °C) (Fig. 3B).

a) Físico-química básica

pH

En referencia a esta variable se encontró un mínimo de 6.68 y un máximo de 8.82 en los sistemas analizados. Se observó un comportamiento homogéneo en los 14 cuerpos de agua, puesto que los valores de pH desde el inicio del estudio, en noviembre de 2007 a junio de 2008, fue incrementando ligeramente (correspondiendo a la época de nortes y secas) y desciende en los meses de lluvias excepto en octubre, donde se registra un tenue aumento (Fig. 4A-N).

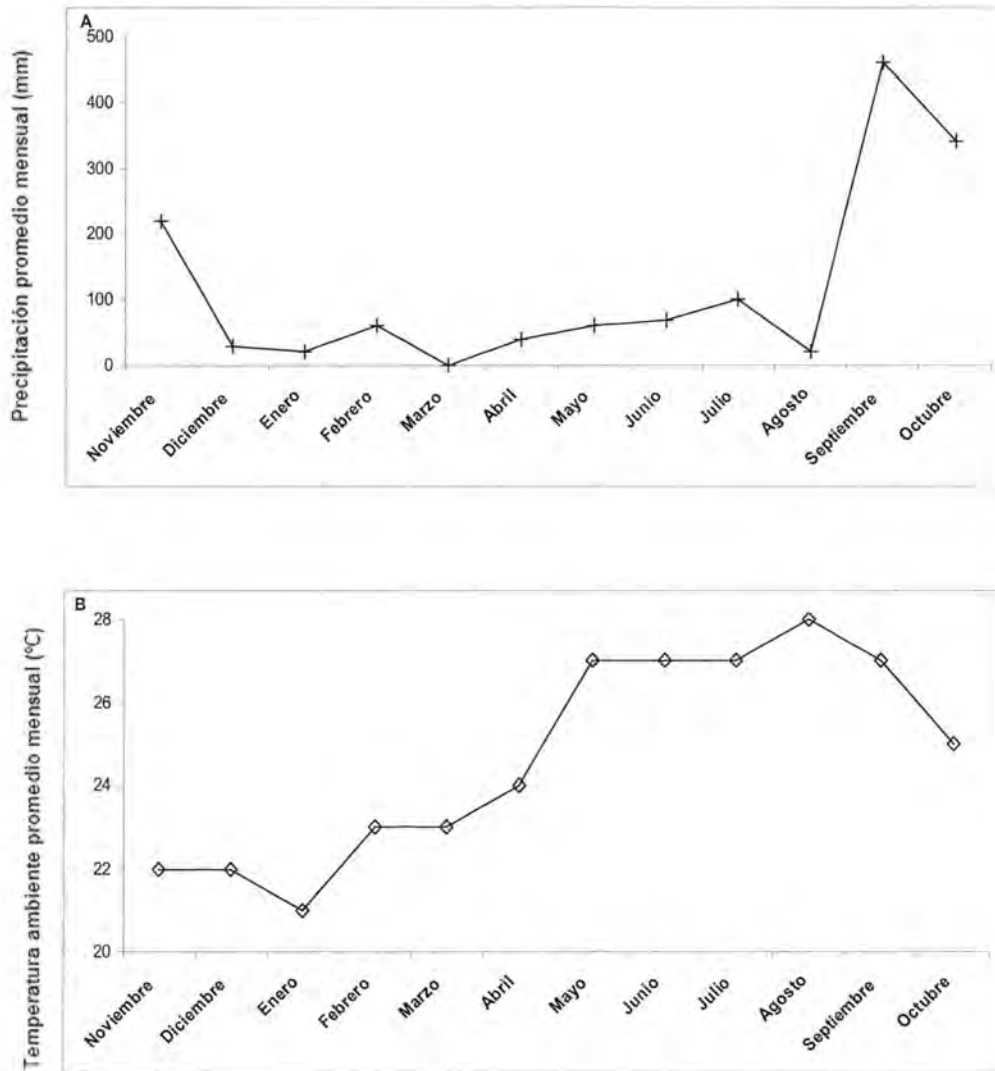


Figura 3. Variación temporal del promedio mensual de la precipitación (A) y temperatura ambiente mensual promedio (B) durante el ciclo anual.

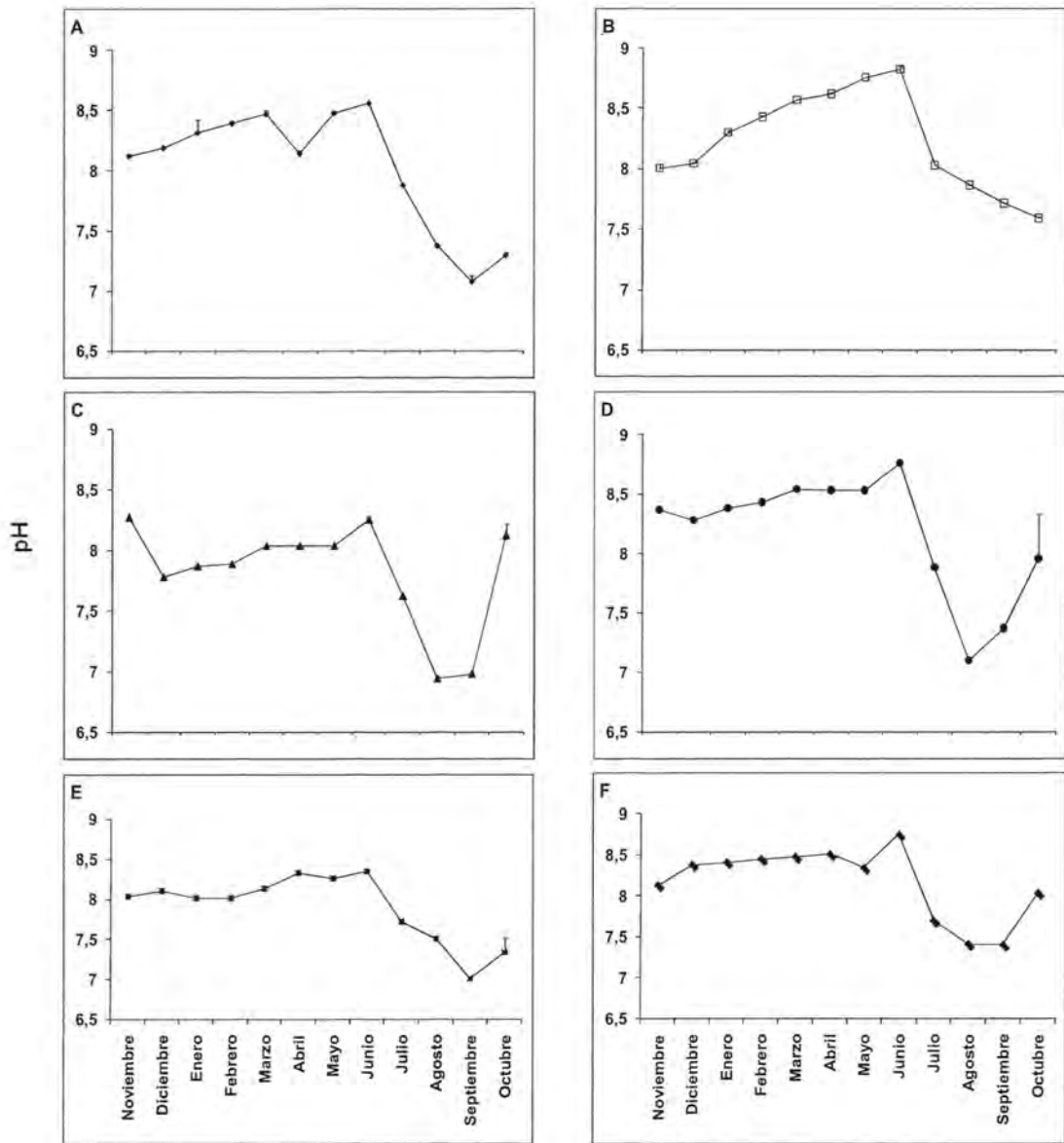


Figura 4. Variación espacio-temporal del pH.

A. Sin Barda; B. Chankanaab III; C. El Poblano; D. Pozo el Poblano; E. Gallinas; F. Palmas.

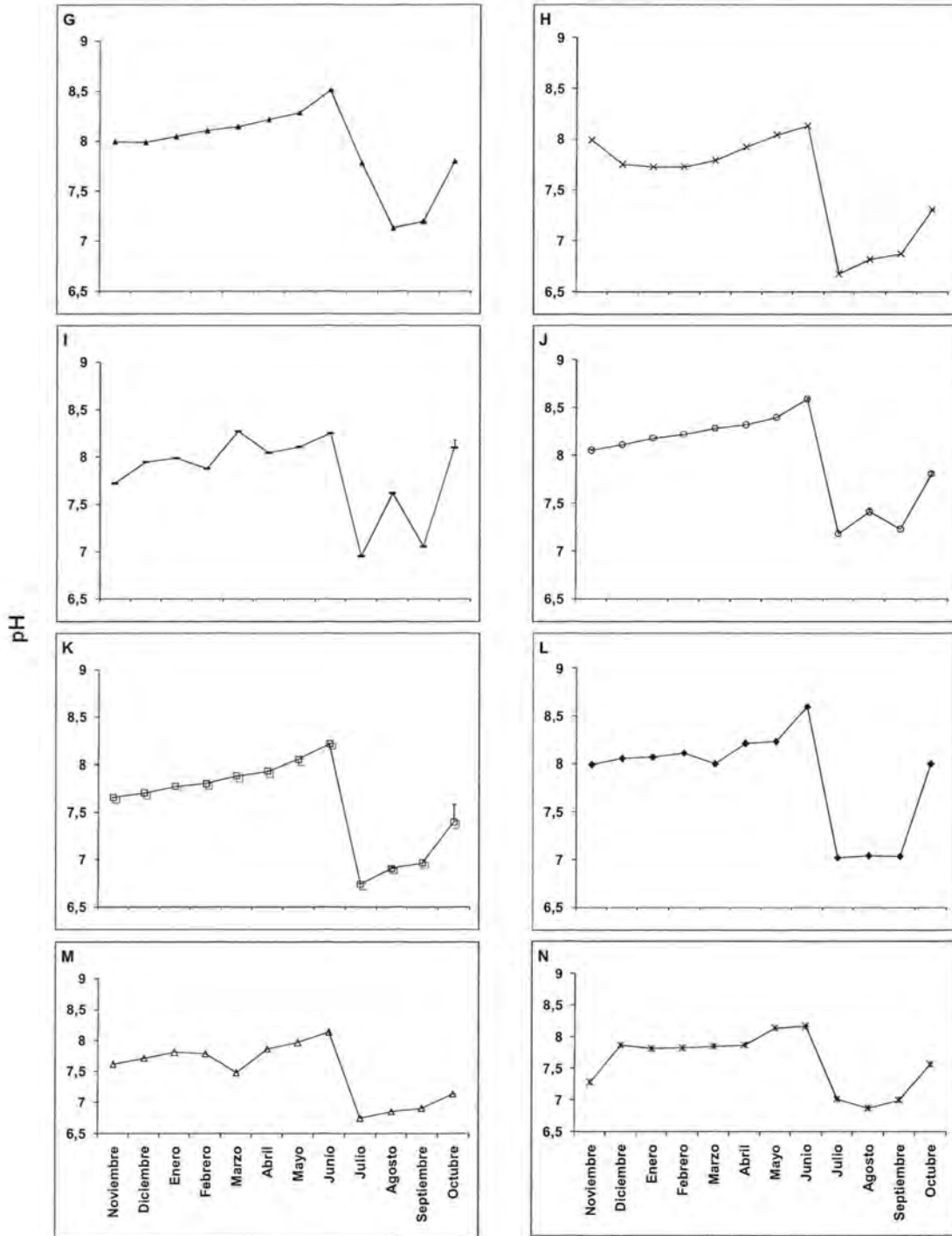


Figura 4. Continuación...G. Casa Verde; H. Moscas; I. San Nicolás; J. Sarapes Mojados; K. San Gervasio I; L. San Gervasio III; M. Manuel Morales; N. José Arguez.

Temperatura del agua

Este parámetro obtuvo su máximo valor con 28.4 °C y mínimo de 23.7 °C, variando dentro de este rango, a lo largo del ciclo anual, en los diferentes pozos y cenotes (Fig. 5A-N).

No obstante, Sin Barda y Chankanaab III (Fig. 5A, B), presentaron diferencias en su comportamiento con respecto a los demás sistemas; en ambos casos, se detectaron oscilaciones semejantes, durante nortes e inicio de secas, donde se obtuvieron valores relativamente más bajos y conforme transcurrió el tiempo, se detectó que la temperatura fue incrementando paulatinamente en la etapa tardía de secas y en toda la temporada de lluvias (de 24.1 a 28.4 °C).

Oxígeno disuelto

Por la heterogeneidad de los resultados obtenidos de esta variable (máximo 7.2 y mínimo 0.1 mg/l) (ver Fig. 6A-N), los sistemas fueron catalogados en diferentes grupos:

- a) Sin Barda, San Gervasio I, Manuel Morales y José Arguez (Fig. 6A, K, M, N): en estos cuerpos de agua se observó un patrón casi homogéneo en la concentración del gas a lo largo del ciclo; en general, dentro del rango de los 2 mg/l, excepto San Gervasio I, cuyos valores se hallan entre los 4 y 5 mg/l durante todo el ciclo anual.
- b) Gallinas y San Nicolás (Fig. 6E, I): las variaciones que presentan durante el estudio son desde 1 hasta 6 mg/l de concentración, sin ningún patrón de comportamiento aparente.
- c) El Poblano, Pozo el Poblano, Palmas, Casa Verde, Moscas, Sarapes Mojados y San Gervasio III (Fig. 6C, D, F, G, H, J, L): el comportamiento de este gas varió de 0 a 2 mg/l en el transcurso del año, destacando que en octubre y noviembre se tuvo un incremento entre 5 y 6 mg/l.
- d) Chankanaab III (Fig. 6B): la tendencia desde el inicio del estudio, fue el aumento a partir de 1 hasta 7 mg/l, a excepción de dos decrementos abruptos en su concentración, en julio y octubre con 0.9 y 1.8 mg/l respectivamente.

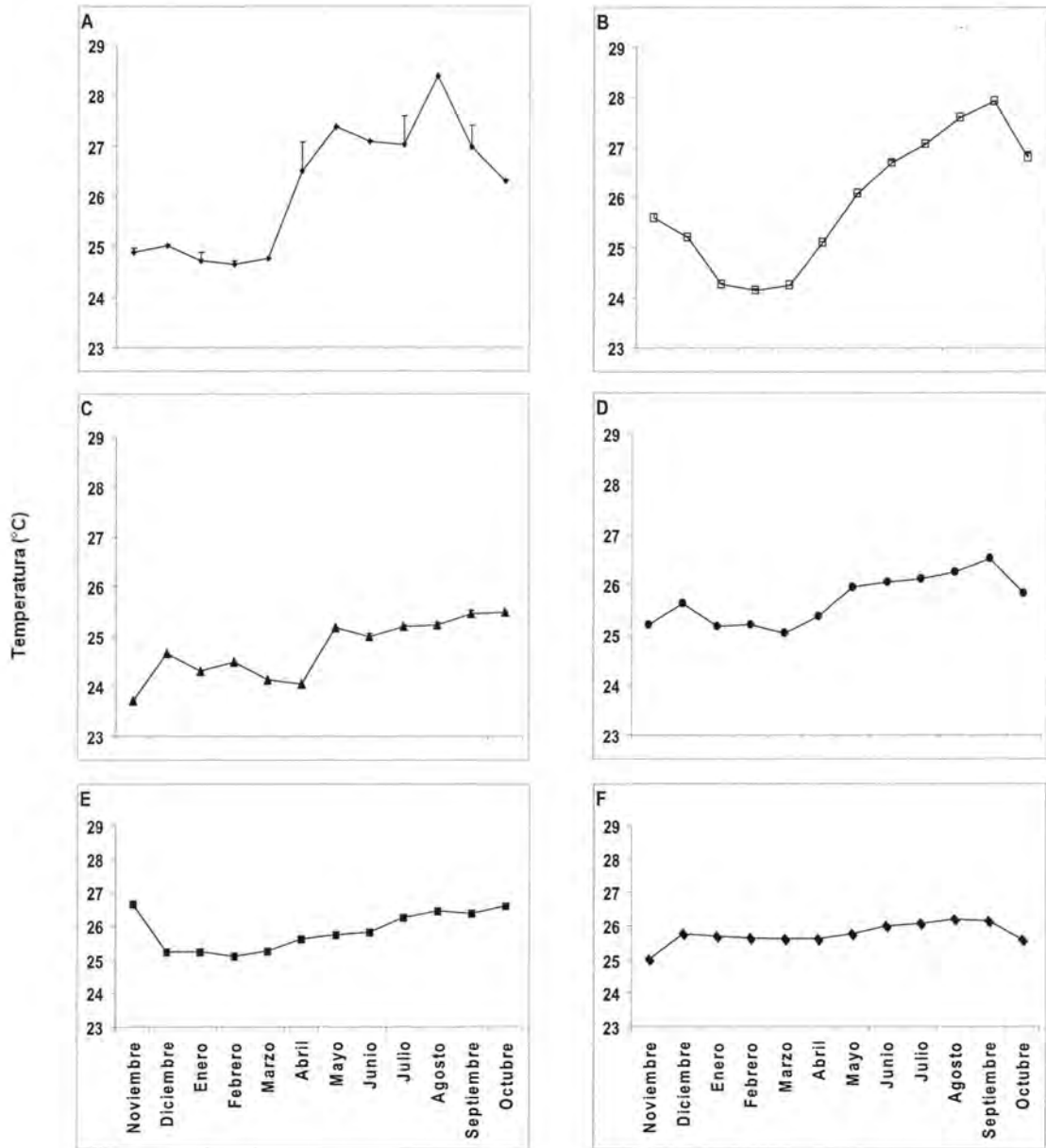


Figura 5. Variación espacio-temporal de la temperatura del agua.
 A. Sin Barda; B. Chankanaab III; C. El Poblano; D. Pozo el Poblano; E. Gallinas; F. Palmas.

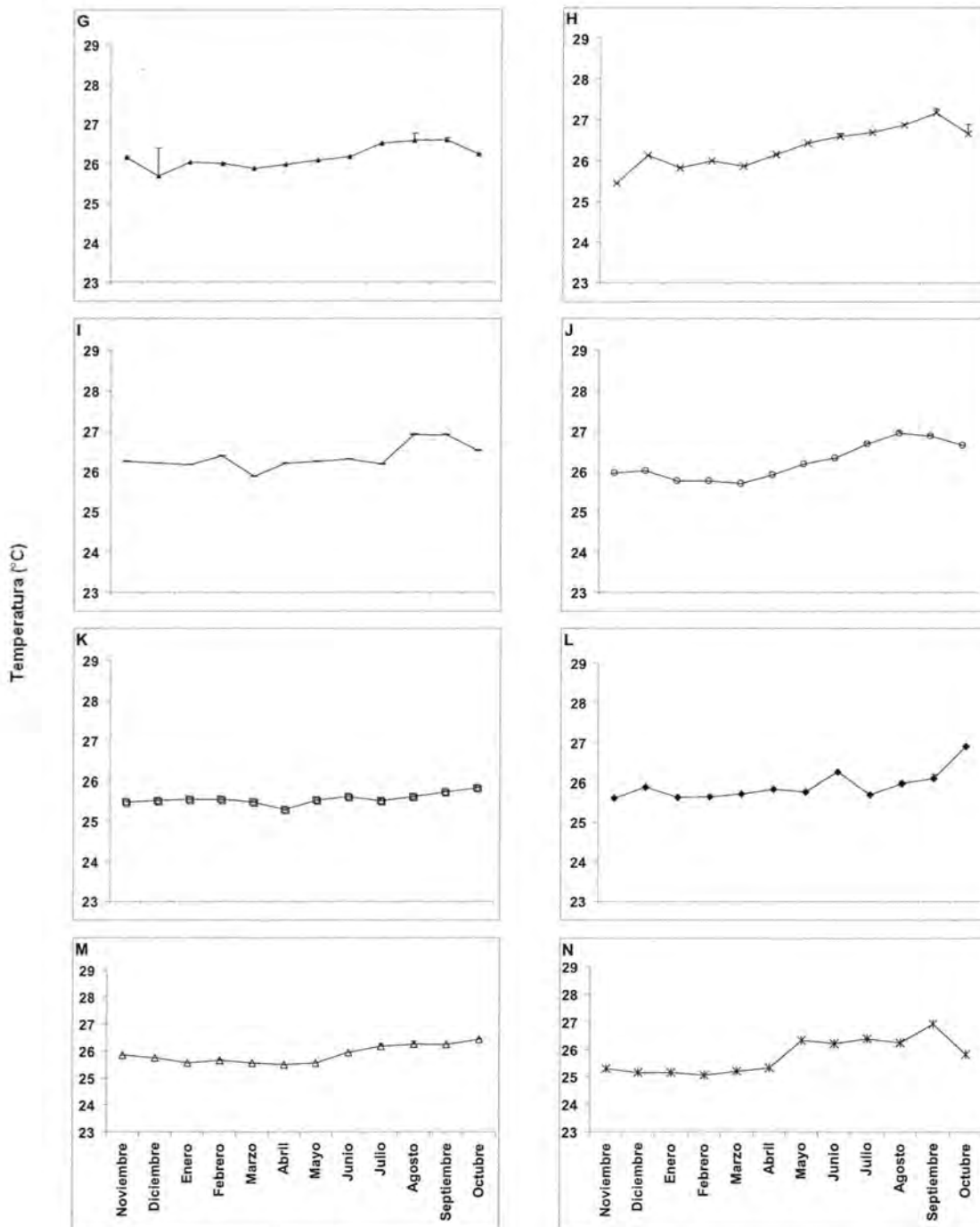


Figura 5. Continuación...G. Casa Verde; H. Moscas; I. San Nicolás; J. Sarapes Mojados; K. San Gervasio I; L. San Gervasio III; M. Manuel Morales; N. José Arguez.

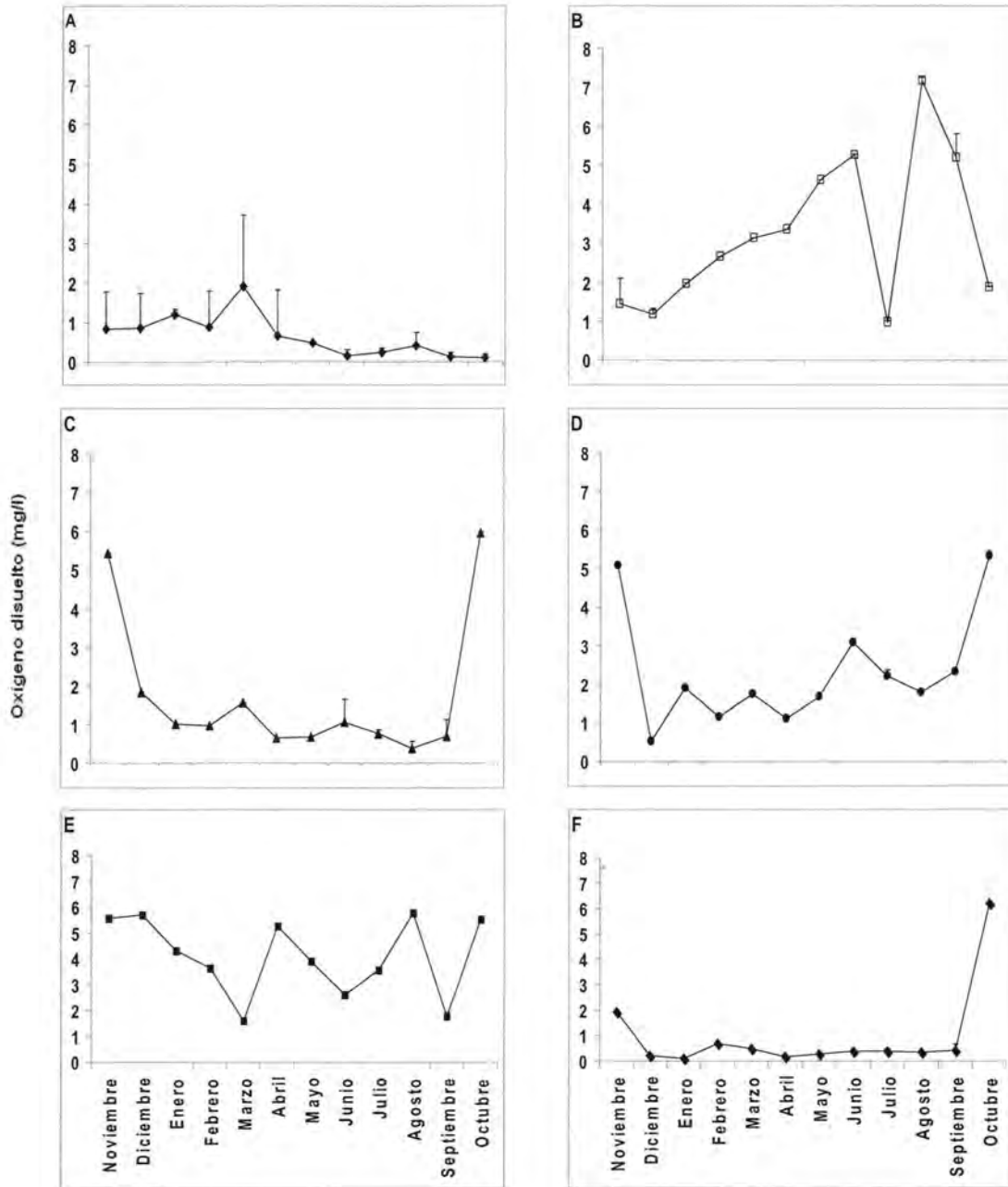


Figura 6. Oscilación espacial y temporal en la concentración de oxígeno.

A. Sin Barda; B. Chankanaab III; C. El Poblano; D. Pozo el Poblano; E. Gallinas; F. Palmas.

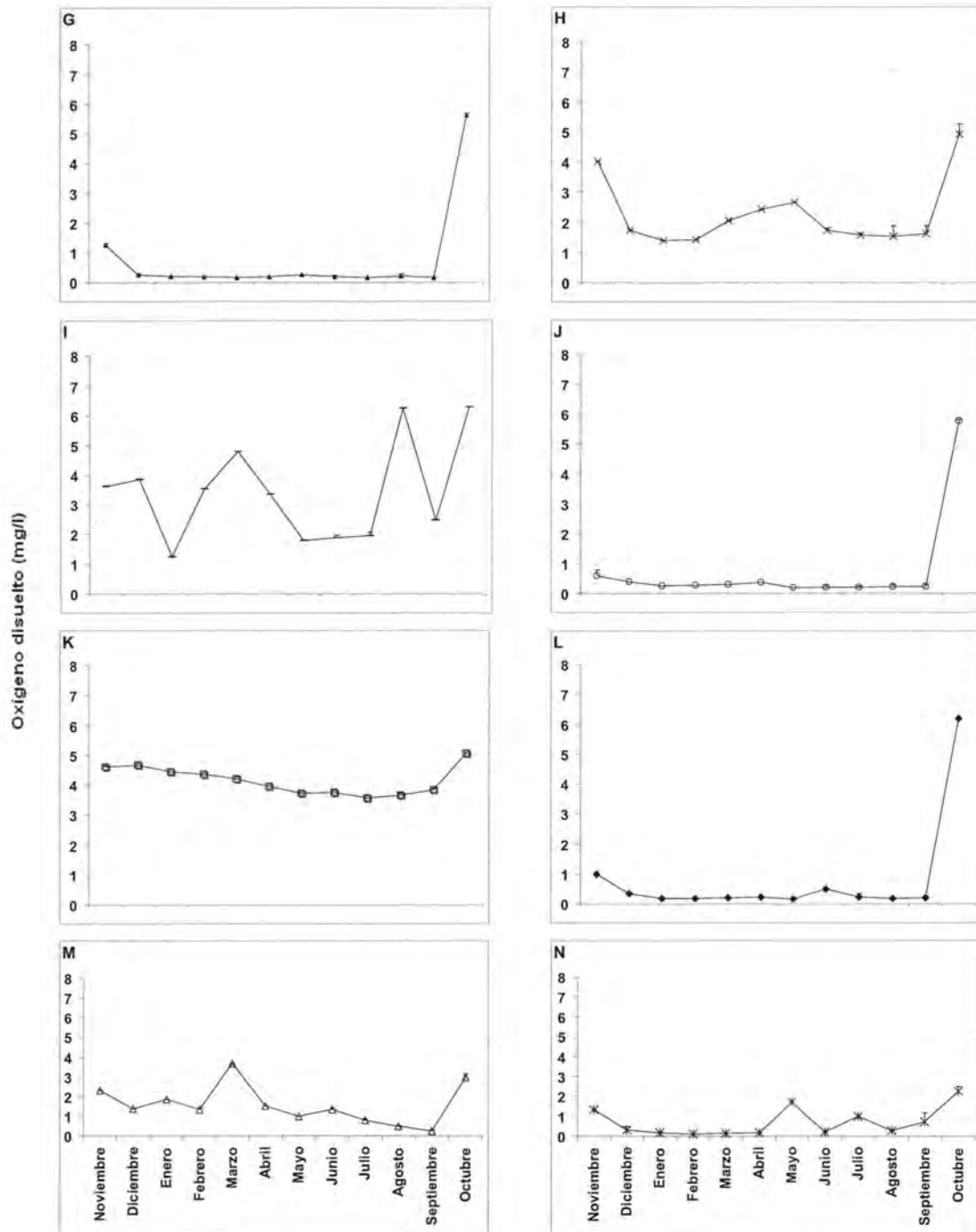


Figura 6. Continuación... G. Casa Verde; H. Moscas; I. San Nicolás; J. Sarapes Mojados; K. San Gervasio I; L. San Gervasio III; M. Manuel Morales; N. José Argáez.

Cloruros

De acuerdo a lo registrado, existieron diferencias entre los cuerpos de agua por la variabilidad en la cantidad de cloruros presentes (Fig. 7A-N), de manera general se observó un decremento para el mes de octubre, excepto en Gallinas. El comportamiento de esta variable se describe a continuación:

- a) Sin Barda y Chankanaab III (Fig. 7A, B): en estos sistemas se registraron las concentraciones más elevadas en comparación con el resto; en el primer caso, osciló desde 700 hasta 3249.8 mg/l, mientras que en el segundo fluctuó de 1900 a 2630.8 mg/l.
- b) El Poblano y Pozo el Poblano (Fig. 7C, D): poseen variaciones entre 87 y 1050 mg/l; encontrando que en la etapa tardía de secas y toda la temporada de lluvias se alcanzaron los índices más altos.
- c) Moscas y San Nicolás (Fig. 7H, I): la concentración de cloruros, en las tres temporadas climáticas, osciló en un rango entre los 500 y 900 mg/l, excepto en la etapa inicial de nortes en Moscas, donde se observó que los valores eran menores a 300 mg/l.
- d) Gallinas, Palmas, Casa Verde, Sarapes Mojados, San Gervasio I, San Gervasio III, Manuel Morales y José Arguez (Fig. 7E, F, G, J, K, L, M, N): presentaron en general un comportamiento homogéneo en el periodo de muestreo, cuyo contenido se presentó por debajo de los 500 mg/l, con un mínimo de 35.4 mg/l.

Conductividad eléctrica

El comportamiento de esta variable (Fig. 8A-N), se detalla en los siguientes grupos:

- a) Sin Barda y Chankanaab III (Fig. 8A, B): en éstos se registraron los valores más altos (4273.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en el primer caso) y un declive en la temporada tardía de lluvias (octubre) en ambos sistemas. Sin Barda, tendió a incrementar de secas a lluvias (de 1000 a poco más de 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$); mientras que Chankanaab III se mantuvo entre los 2500 y 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las tres temporadas de estudio.
- b) El Poblano y Pozo el Poblano (Fig. 8C, D): en estos cuerpos de agua, durante la etapa tardía de lluvias y temprana de nortes (octubre y noviembre respectivamente) presentan descensos en sus valores de conductividad; mientras que en secas y el resto de lluvias, el patrón de comportamiento es con

tendencia al aumento, con un valor máximo de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Gallinas, San Gervasio I, Manuel Morales y José Arguez (Fig. 8E, K, M, N): en general, se observó que las fluctuaciones eran aproximadamente de 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las tres épocas climáticas, salvo los dos últimos casos que presentan disminución al final de lluvias e inicio de nortes, mientras que Gallinas ligeramente aumenta en octubre.

- c) Palmas, Casa Verde, Sarapes Mojados, San Gervasio III (Fig. 8F, G, J, L): la conductividad eléctrica registrada fue menor a los 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con comportamiento homogéneo en el tiempo, a excepción del decremento observado en el último mes de estudio en lluvias.
- d) Moscas y San Nicolás (Fig. 8H, I): son sistemas que obtuvieron semejanza durante el periodo de estudio con menos de 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$; empero en la temporada tardía de lluvias (octubre) sus valores disminuyeron abruptamente en ambos casos. Adicionalmente Moscas exhibió otro declive en la etapa temprana de nortes (noviembre).

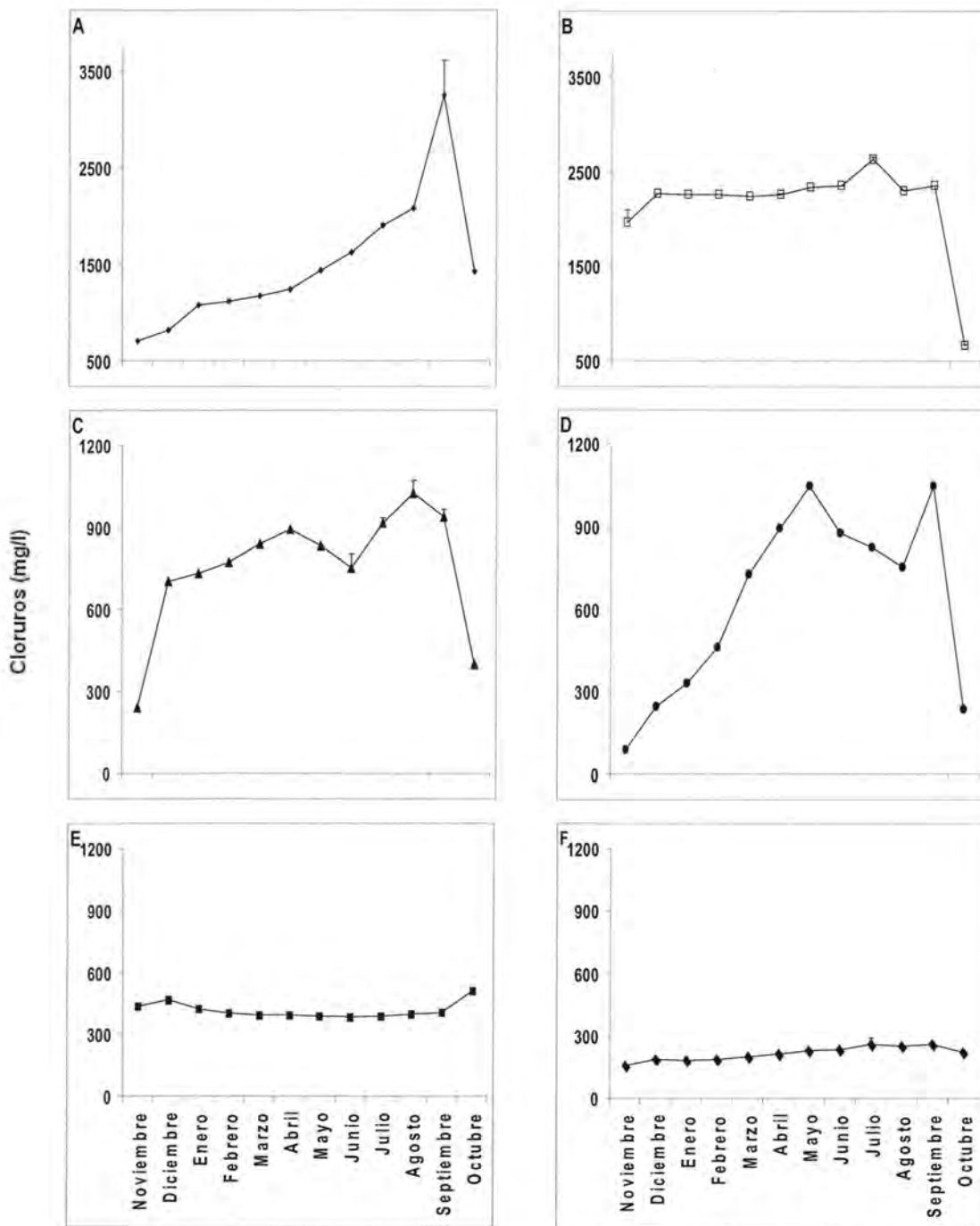


Figura 7. Oscilación espacial y temporal en el contenido de cloruros.

A. Sin Barda; B. Chankanaab III; C. El Poblano; D. Pozo el Poblano; E. Gallinas; F. Palmas.

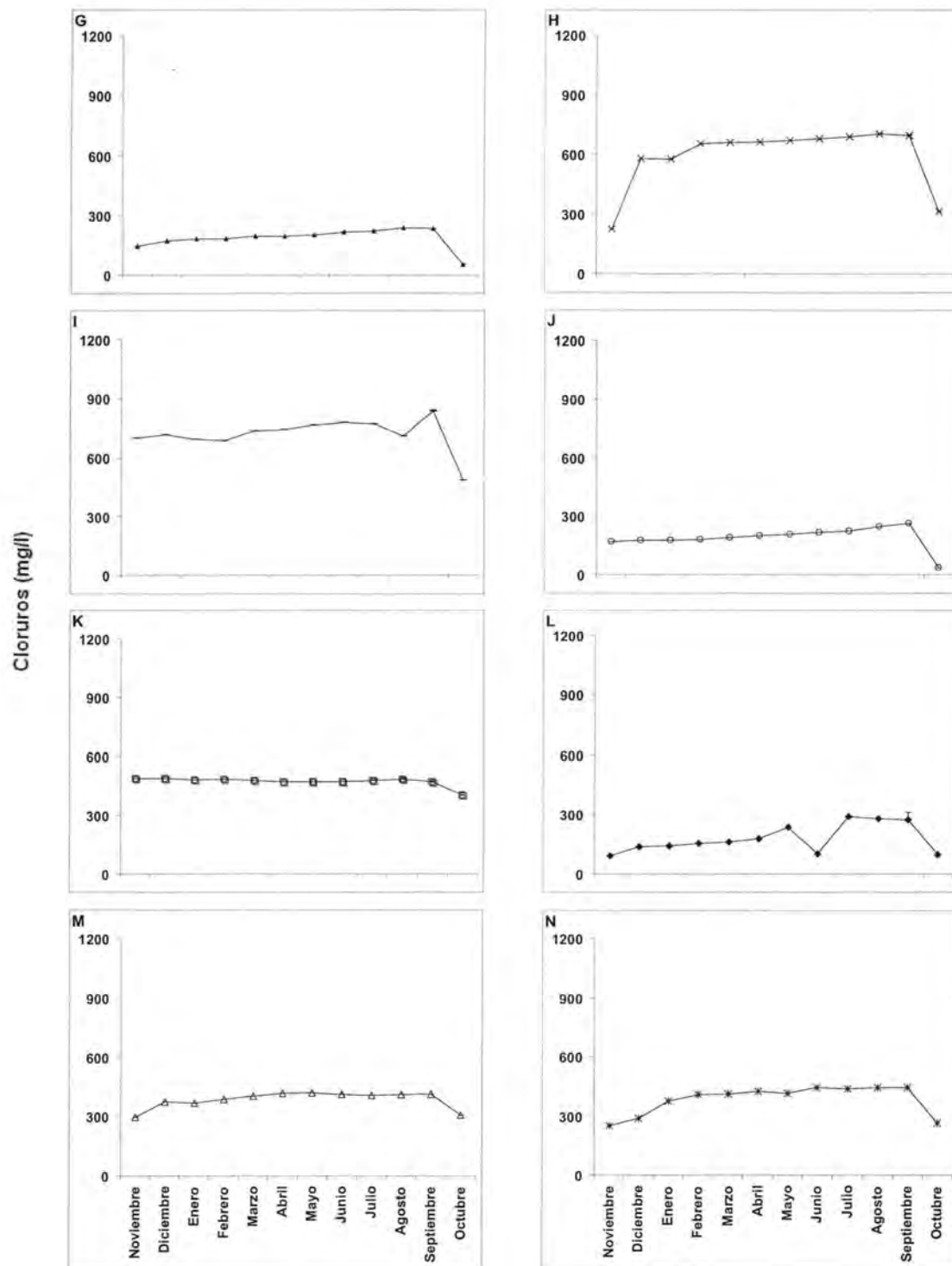


Figura 7. Continuación... G. Casa Verde; H. Moscas; I. San Nicolás; J. Sarapes Mojados; K. San Gervasio I; L. San Gervasio III; M. Manuel Morales; N. José Arguez.

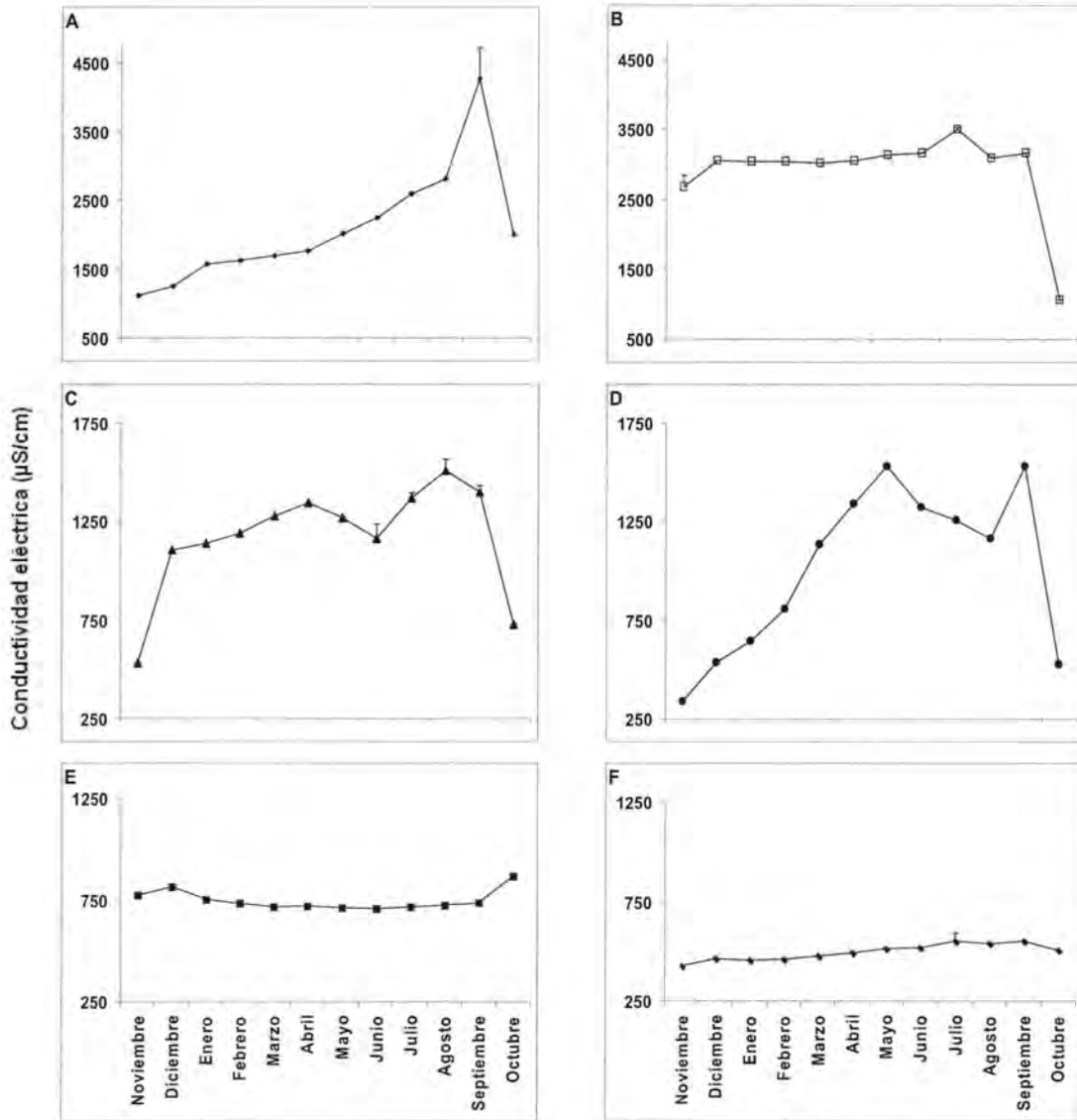


Figura 8. Fluctuación espacio-temporal de la conductividad eléctrica.

A. Sin Barda; B. Chankanaab III; C. El Poblano; D. Pozo el Poblano; E. Gallinas; F. Palmas.

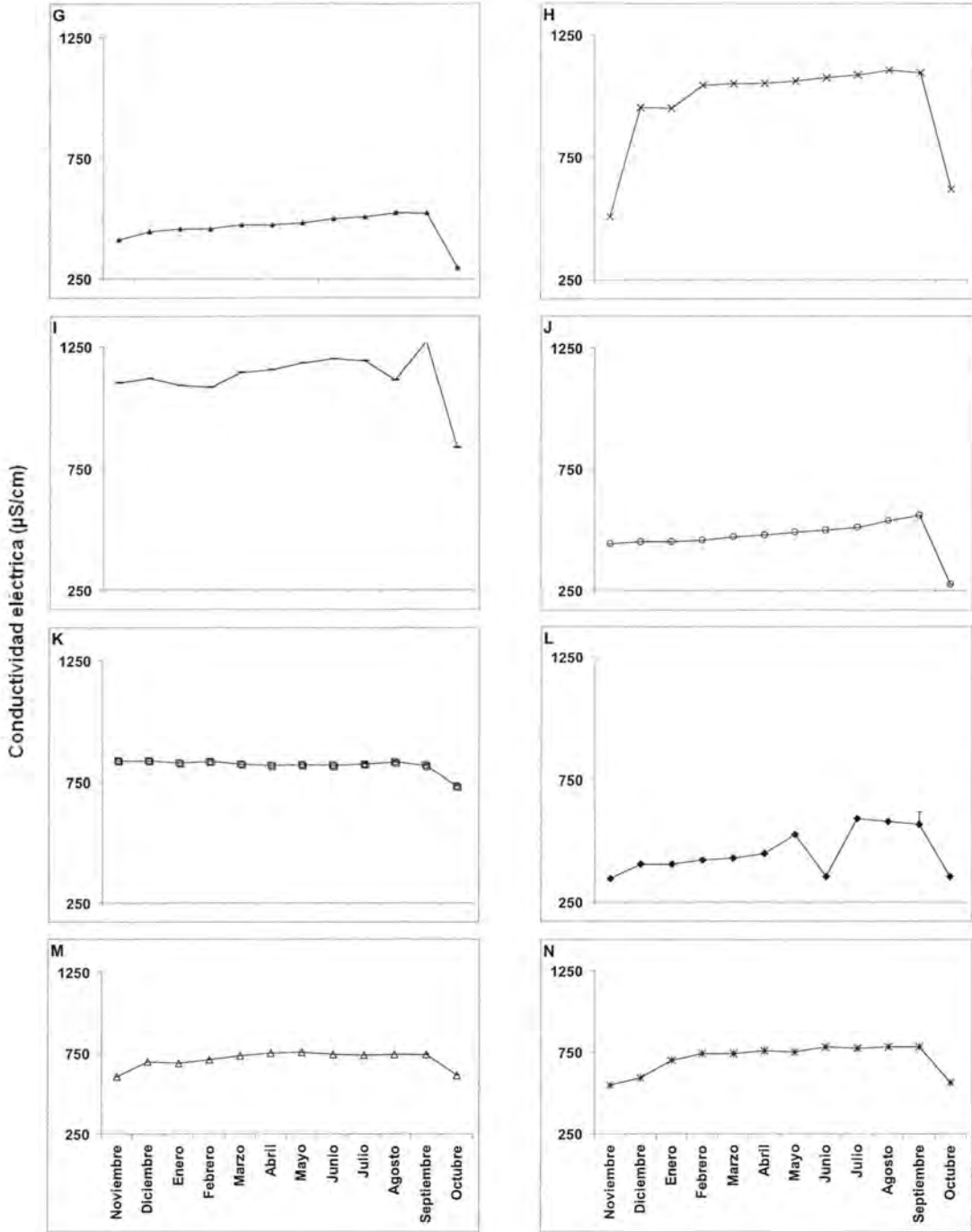


Figura 8. Continuación... G. Casa Verde; H. Moscas; I. San Nicolás; J. Sarapes Mojados; K. San Gervasio I; L. San Gervasio III; M. Manuel Morales; N. José Arguez.

Salinidad

Con los datos examinados, es posible afirmar que todos los pozos y cenotes, contienen agua dulce (0.5 ± 0.4 mg/l) (Fig. 9C-N), a excepción de Sin Barda y Chankanaab III. Por otro lado, se observó de manera general que en la etapa final de lluvias e inicial de nortes, las concentraciones de este parámetro fueron menores. A continuación se citan las diferencias:

- a) Sin Barda y Chankanaab III (Fig. 9A, B): tuvieron valores de 0.5 hasta un máximo de 2.35 mg/l (Sin Barda). En el primer caso, el comportamiento fue de incremento hasta obtener su máximo en septiembre; por otro lado, Chankanaab III se mantuvo alrededor de 1.5 mg/l.
- b) El Poblano y Pozo el Poblano (Fig. 9C, D): se mantuvieron entre 0.5 y menos de 1 mg/l en las tres temporadas.
- c) Gallinas, Moscas y San Nicolás (Fig. 9E, H, I): presentaron homogeneidad durante el ciclo anual en alrededor de 0.5 mg/l.
- d) Palmas, Casa Verde, Sarapes Mojados, San Gervasio I, San Gervasio III, Manuel Morales y José Arguez (Fig. 9F, G, J, K, L, M, N), mostraron uniformidad con valores entre 0.1 y 0.5 mg/l.

Sólidos disueltos totales

El rango de valores que se encontró en los SDT, es de un mínimo de 110 mg/l en el inicio de nortes, con un máximo de 1870 mg/l en secas (Fig. 10A-N), teniendo de promedio general 565.7 ± 390.1 mg/l. Agrupándose de la siguiente manera:

- a) Sin Barda y Chanakanaab III (Fig. 10A, B): registraron la mayor cantidad de SDT, con valores fluctuantes entre los 500 y 2000 mg/l y marcados descensos al final de lluvias (octubre).
- b) El Poblano y Pozo el Poblano (Fig. 10C, D): tuvieron un rango entre los 250 y 850 mg/l, sin un patrón definido en su comportamiento. El Poblano presenta en nortes (noviembre), secas (marzo) y lluvias (octubre) los valores más bajos; Pozo el Poblano, coincide en estos decrementos a excepción en el mes de marzo.
- c) Gallinas, Moscas, San Nicolás, San Gervasio I, Manuel Morales y José Arguez (Fig. 10E, H, I, K, M, N): no mostraron regularidad en las variaciones temporales, empero, en su generalidad se concentró la mayor cantidad alrededor de los 500 mg/l.

- d) Palmas, Casa Verde, Sarapes Mojados y San Gervasio III (Fig. 10F, G, J, L): fueron los sistemas con menor contenido de SDT, entre 100 y 500 mg/l; en los tres primeros casos se observó incremento en diciembre, septiembre y marzo, respectivamente, que sobrepasó los 500 mg/l.

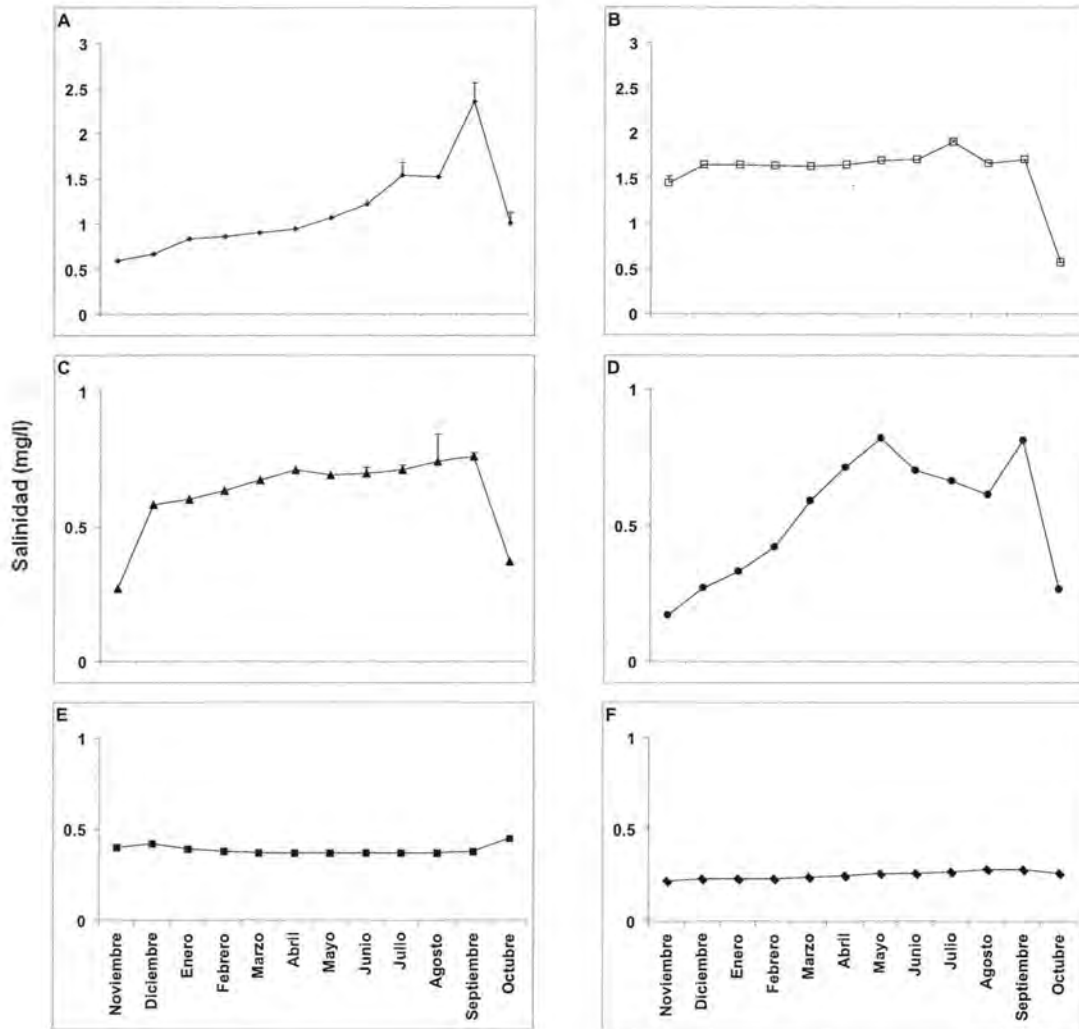


Figura 9. Fluctuación espacio-temporal de la salinidad.

A. Sin Barda; B. Chankanaab III; C. El Poblano; D. Pozo el Poblano; E. Gallinas; F. Palmas.

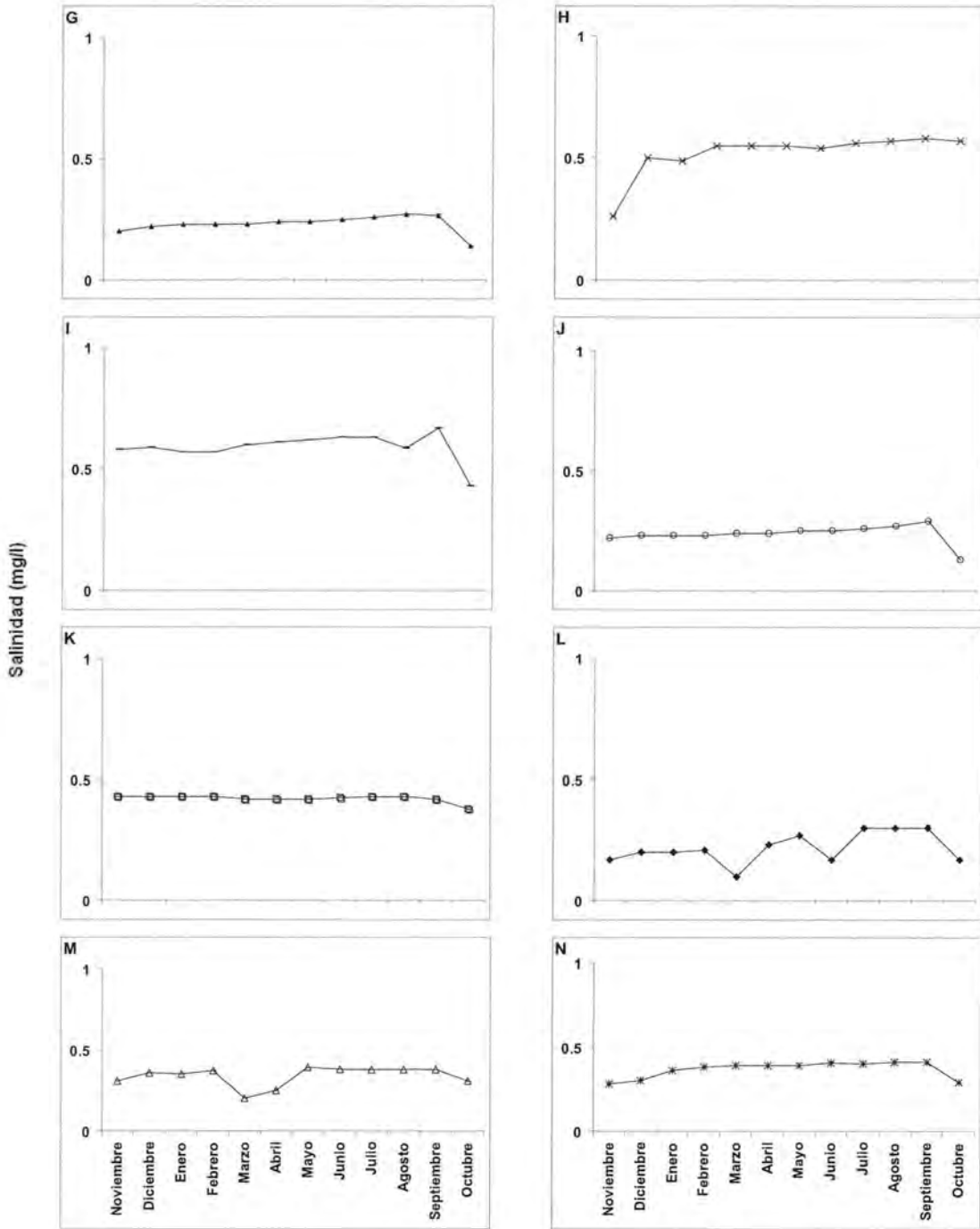


Figura 9. Continuación...G. Casa Verde; H. Moscas; I. San Nicolás; J. Sarapes Mojados; K. San Gervasio I; L. San Gervasio III; M. Manuel Morales; N. José Argaez.

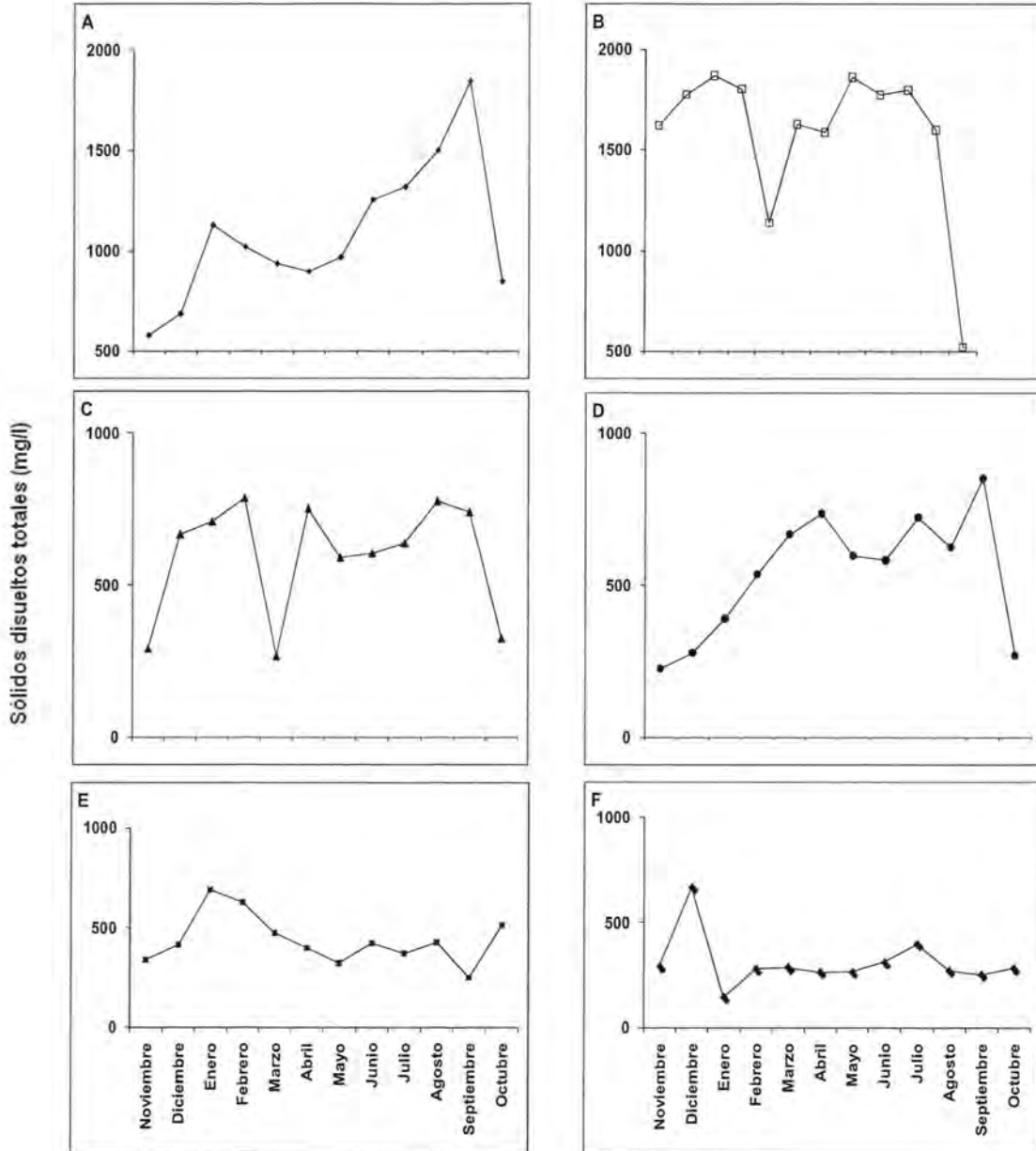


Figura 10. Variación espacial y temporal en el contenido de sólidos disueltos totales. A. Sin Barda; B. Chankanaab III; C. El Poblano; D. Pozo el Poblano; E. Gallinas; F. Palmas.

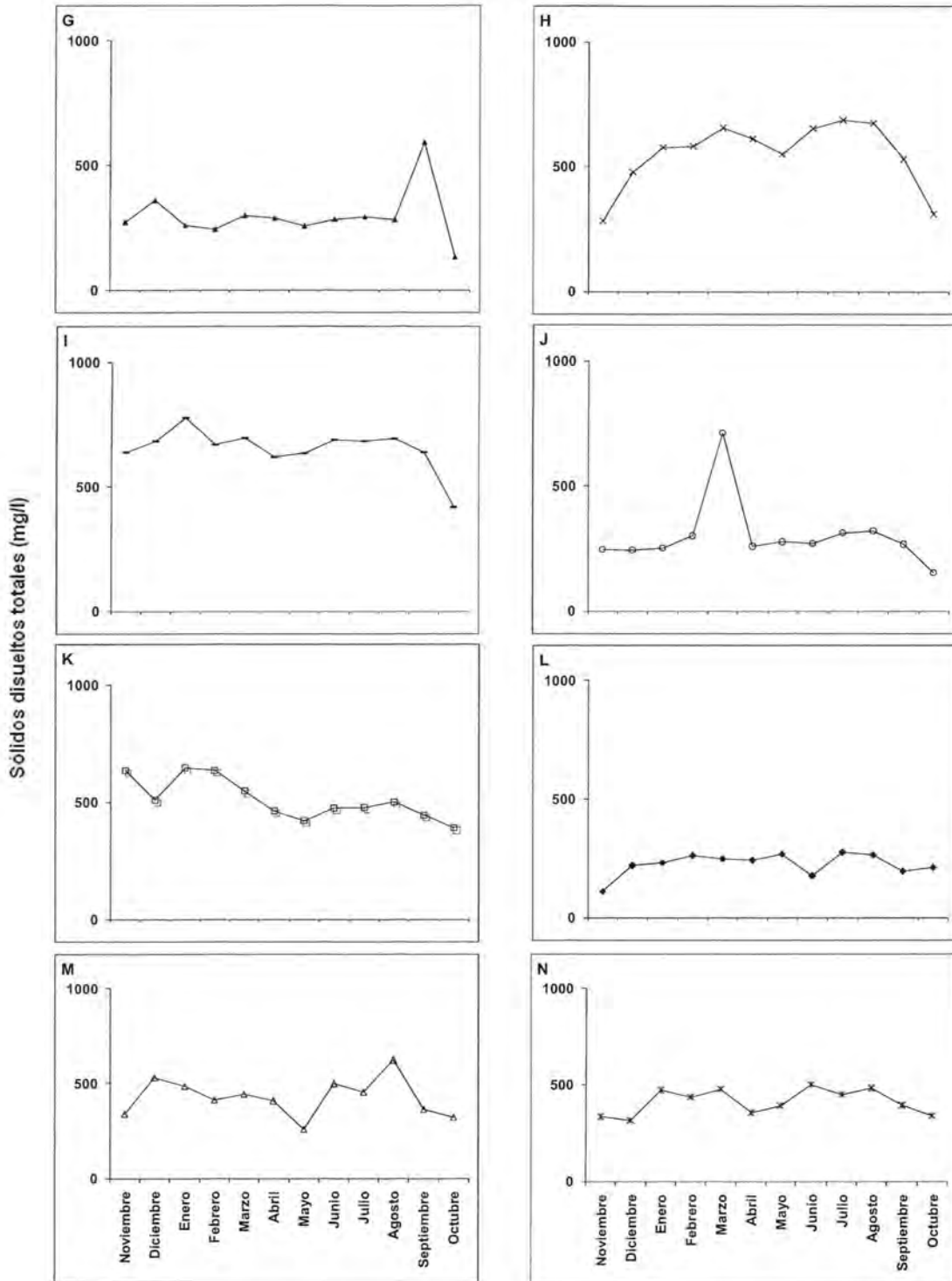


Fig. 10. Continuación... G. Casa Verde; H. Moscas; I. San Nicolás; J. Sarapes Mojados; K. San Gervasio I; L. San Gervasio III; M. Manuel Morales; N. José Arguez.

b) Características de los sistemas

Las variaciones del espesor de la lente de agua dieron lugar a que los pozos y cenotes se describieran en tres categorías (Fig. 11A-N):

- a) Sin Barda, Chankanaab III, Pozo el Poblano, Casa Verde, San Gervasio I y José Arguez (Fig. 11A, B, D, G, K, N): la profundidad de éstos fluctuó entre 1 y 2 m, pero en el caso de Casa Verde, su DC permaneció entre 2 y 3 m en todas las épocas climáticas.
- b) El Poblano, Gallinas, Palmas y Manuel Morales (Fig. 11C, E, F, M): registraron una columna agua no mayor a 1 m en todo el ciclo anual. Gallinas, presentó, en lluvias (agosto), la menor DC en todos los cuerpos evaluados con 0.20 m.
- c) Moscas, San Nicolás, Sarapes Mojados y San Gervasio III (Fig. 11H, I, J, L): tuvieron una profundidad que varió en poco más de 1 m hasta 1.5 m. Sin embargo, se debe resaltar que Moscas, en el último mes de lluvias (octubre 2008), alcanzó el máximo de DC de todos los sistemas con 4.16 m.

Es importante mencionar que en la época de lluvias y nortes la DC, en todos los cuerpos de agua tendió a ser más grande en comparación con la temporada de secas.

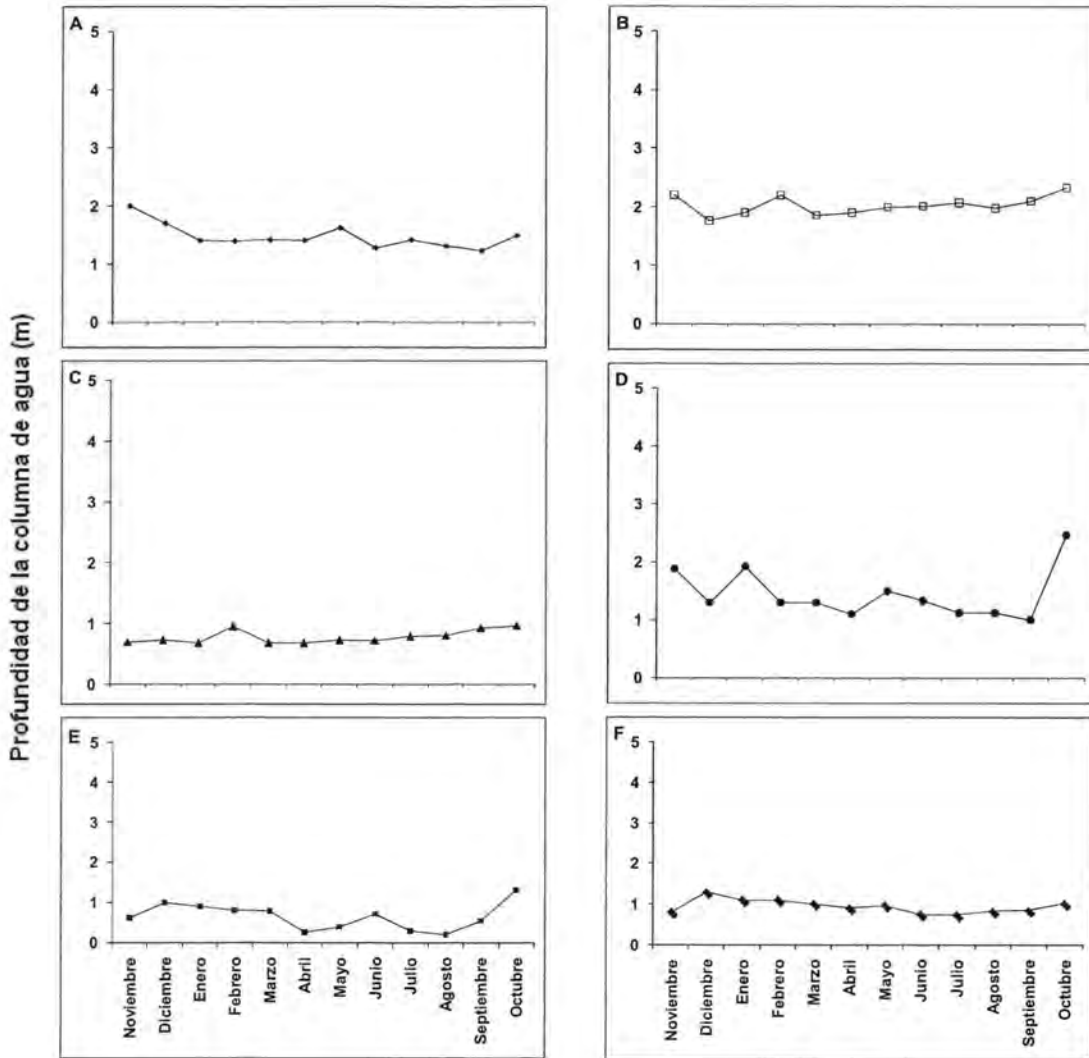


Figura 11. Oscilación espacio-temporal de la profundidad de los sistemas evaluados A. Sin Barda; B. Chankanaab III; C. El Poblano; D. Pozo el Poblano; E. Gallinas; F. Palmas.

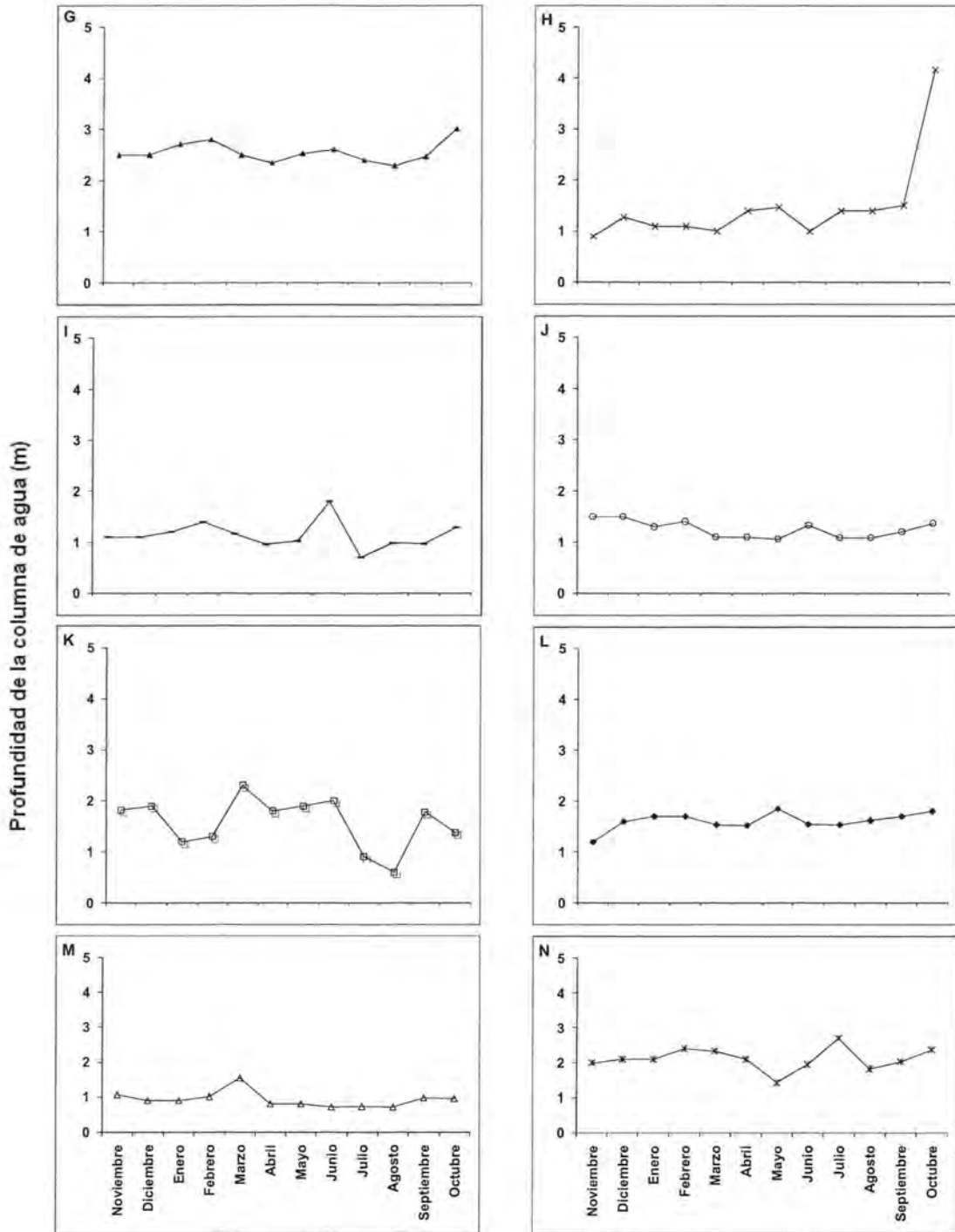


Figura 11. Continuación... G. Casa Verde; H. Moscas; I. San Nicolás; J. Sarapes Mojados; K. San Gervasio I; L. San Gervasio III; M. Manuel Morales; N. José Arguez.

c) Relación entre variables

En la Tabla 2, se puede apreciar qué variables presentaron los mayores índices de relación. Tal es el caso de la conductividad eléctrica con los Cl^- , la salinidad y los SDT. Asimismo, se aprecia que la salinidad, guarda estrecha correspondencia con los Cl^- y SDT; mientras que éstos últimos también se hallan correlacionados entre sí.

Por otra parte, algunos parámetros pese a los bajos valores de relación encontrados, poseen una alta probabilidad asociada a que dichas relaciones se vuelvan a presentar. Como sucede en la temperatura ambiente con la precipitación, la temperatura del agua, la salinidad y los Cl^- la precipitación con la temperatura del agua y pH. O bien, el oxígeno disuelto con la conductividad eléctrica, salinidad, Cl^- y SDT.

No obstante, también se dieron relaciones inversas entre los parámetros evaluados, con alta posibilidad de que presenten estos resultados nuevamente, esta es la situación que mostró el pH con la temperatura del agua y la temperatura ambiente.

No se encontraron relaciones estadísticamente significativas en el resto de las variables evaluadas.

Tabla 2. Correlación de Spearman. Para cada caso, la primera línea representa la relación entre las variables (r_s); mientras que la segunda es la probabilidad asociada (p).

	Temperatura ambiente (°C)	Precipitación (mm)	O ₂ (mg/l)	Temperatura del agua (°C)	pH	Conductividad eléctrica (µS/cm)	Salinidad (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)
Precipitación	0.2770 0.0004							
O ₂	-0.0601 0.4370	0.1495 0.0534						
Temperatura del agua	0.5630 0.0000	0.3455 0.0000	-0.0369 0.6332					
pH	-0.2907 0.0002	0.2518 0.0011	-0.0441 0.5684	-0.3153 0.0000				
Conductividad eléctrica	0.1871 0.0156	-0.0445 0.5653	0.2850 0.0002	0.0071 0.9264	-0.0666 0.3896			
Salinidad	0.1908 0.0137	-0.0239 0.7574	0.2733 0.0004	0.0142 0.8543	-0.0572 0.4600	0.9904 0.0000		
Cl ⁻	0.1871 0.0156	-0.0445 0.5653	0.2850 0.0002	0.0071 0.9264	-0.0666 0.3896	1 0.0000	0.9904 0.0000	
SDT	0.0617 0.4256	-0.1420 0.0665	0.2385 0.0021	-0.0164 0.8326	-0.0220 0.7766	0.8888 0.0000	0.8816 0.0000	0.8888 0.0000

DISCUSIÓN

Graniel *et al.* (2003) y Jones y Bannes (2003), establecen que el agua subterránea en islas tropicales de origen cárstico está significativamente influenciada por las condiciones climáticas, sobre todo por los patrones de precipitación locales, ya que el tiempo de residencia del agua cambia por las variaciones interanuales debido a la recarga del acuífero. Asimismo, Bustcher y Huggenberger (2009) señalan que la poca variabilidad en las oscilaciones de los parámetros físicos y químicos, se deben a dicho origen.

Bonacci (1990), concuerda con lo expuesto con estos autores, indicando que la complejidad del sistema cárstico radica en la interacción existente entre el agua superficial y subterránea, ésta última bajo influencia de los factores ambientales predominantes en el momento, lo cual se debe considerar en el estudio e interpretación de datos en aguas de naturaleza cárstica.

Las fluctuaciones químicas en el agua operan a diferentes escalas de tiempo, verbigracia, en un ciclo anual se presentan periodos de lluvias y secas, pero en el transcurso se semanas existen cambios de acuerdo a la dinámica del acuífero (White, 1993).

En este estudio, fue posible determinar el efecto de las condiciones climáticas locales sobre las características del agua analizadas: por ejemplo, a través de la correlación de Spearman fue posible determinar la influencia (directa o inversa) de la temperatura ambiente y la precipitación sobre factores físicos (temperatura del agua) y de contenido iónico (pH, salinidad y cloruros), del agua almacenada en los pozos de uso común en Cozumel. Antes de este estudio, no había referencia que evaluara las oscilaciones de las características básicas del agua subterránea en los sistemas acuáticos cársticos de la Isla durante un ciclo anual. En general los estudios previos, han sido de tipo puntual (ver Cervantes-Martínez 2008; Gutiérrez-Aguirre *et al.*, 2008).

Entonces, este análisis constituye una aportación importante, sobre el conocimiento básico del comportamiento y dinámica del acuífero de Cozumel. Aunque en la región existen trabajos donde se sugiere que en sistemas subterráneos la temporalidad influye en el comportamiento hidrodinámico del acuífero debido a los cambios provocados por la percolación y a los niveles de evapotranspiración en cada

temporada (González-Herrera *et al.*, 2002; Sánchez y Pinto *et al.*, 2005 y Gutiérrez-Aguirre y Cervantes-Martínez, 2008); es hasta el presente estudio, donde se especifican de forma concreta, las variaciones producidas por el ambiente en el acuífero de Cozumel.

De acuerdo a la correlación de Spearman, la temperatura ambiente influye de forma directa, alta y significativa sobre la temperatura del agua subterránea en los sistemas analizados en Cozumel. Este tipo de hallazgo puede explicarse debido a la constante y elevada radiación solar que ocurre en los trópicos (Lewis, 1996). En sistemas como Sin Barda y Chankanaab III, los cambios de la temperatura del agua por efecto de los cambios ambientales son más evidentes; mientras que en sistemas como Gallinas, Palmas, Casa Verde, San Nicolás, San Gervasio I y Manuel Morales, aparentemente al grado de incidencia es menor.

Por otro lado, el contenido iónico (conductividad eléctrica, salinidad y cloruros), de los cuerpos de agua analizados también está relacionado con la temperatura ambiente. Este comportamiento es típico de sistemas superficiales, donde el efecto de la evaporación por temperaturas ambientales altas, produce mayor concentración de iones en el agua (Kalff, 2002). Sin embargo, este efecto no se ha registrado en aguas subterráneas; en este estudio, se encontró una relación directa y significativa, pero baja.

Esto podría sugerir que sistemas con mayor ascendiente superficial (como Sin Barda y Chankanaab III), probablemente influyeron sobre la significancia de la prueba estadística; debido a que en el resto de los sistemas (por ejemplo Gallinas, Palmas, Casa Verde, San Nicolás, San Gervasio I Manuel Morales, entre otros) el contenido iónico permaneció prácticamente constante a lo largo del ciclo estudiado.

La relación inversa de la temperatura ambiente con el pH es significativa, con un valor intermedio en función de los resultados aquí expuestos. Puede explicarse por lo siguiente: la disminución en el pH corresponde con los niveles más altos de precipitación y temperatura ambiente, sugiriendo que la recarga del acuífero y el volumen transportado por efecto de las lluvias producen una dilución en la concentración de hidrogeniones (Cerón *et al.*, 2005). Incluso, se ha reportado que sistemas de la Península de Yucatán con mayor flujo subterráneo, presentan pH con tendencia hacia la neutralidad (Schmitter-Soto *et al.*, 2002b).

Físico-química básica

La estabilidad del pH durante secas y nortes en los sistemas estudiados, podría estar controlada por el balance entre el bióxido de carbono (de gran relevancia por la disolución de las calizas) (Yáñez-Mendoza *et al.*, 2008), los iones carbonatos y bicarbonatos naturales del terreno, los cuales funcionan como sistema amortiguador (tampón) (Stoessell *et al.*, 1989).

En aguas subterráneas de terreno cárstico, se estima que el pH oscila entre 6 y 9 unidades, por el efecto tampón ($\text{CO}_2\text{-H}_2\text{CO}_3\text{-HCO}_3^-\text{CO}_3$). Yáñez-Mendoza *et al.* (2008) y Cervantes-Martínez (2008), hacen énfasis que el rango de pH encontrado en cenotes de Cozumel con influencia marina es de 7.01 a 8.21 unidades.

No obstante, en los sistemas cársticos evaluados en este estudio, se encontró una gama más amplia de valores de pH, que va de ligeramente ácido (6.7) hasta de tipo básico (8.8); coincidiendo con lo expuesto por Schmitter-Soto *et al.* (2002a,b) y Cervantes-Martínez (2008), quienes señalan que el rango de pH en cuerpos de agua cársticos sin influencia marina es de 6.7 a 8.6 unidades. Matthes (2008), explica que los sistemas cuyo pH fluctúa en la neutralidad, son los que están relacionados con el agua subterránea, ya que ésta tiene como característica tal comportamiento con tendencia a disminuir con base en la profundidad.

En adición a lo que se mencionó antes en relación con la temperatura del agua, es posible determinar que en la mayoría de los cuerpos de agua estudiados se presentaron ligeros incrementos en la etapa tardía de secas y lluvias (máximo 2 °C); manteniéndose prácticamente constante el resto del año (en el Poblano, Pozo el Poblano, San Gervasio I, Manuel Morales, entre otros). Sin embargo, la influencia del agua subterránea, aparentemente es menor en Sin Barda y Chankanaab III, donde los cambios en la temperatura del agua son de mayor magnitud entre secas y lluvias (entre 3 y 4 °C); éstos resultados sugieren que estos sistemas están dominados más por la incidencia ambiental y no tanto por la subterránea.

En sistemas acuáticos cársticos del norte de Quintana Roo, la temperatura del agua subterránea es de 23 a 25 °C y aumenta conforme existe influencia de las condiciones atmosféricas (Matthes, 2008). Así por ejemplo, en sistemas superficiales de la misma región la variación de nortes a secas es de hasta 6 °C (Flores-Nava, 1994; Cervantes-Martínez, 2005).

Para el caso del oxígeno disuelto, prácticamente no existen en la región registros que consideren el comportamiento a lo largo de un ciclo anual debido a que usualmente se considera como un parámetro invariable en agua subterránea (Gutiérrez-Aguirre y Cervantes-Martínez, 2008). Esta afirmación pudo comprobarse en tres de los sistemas estudiados (San Gervasio I, Manuel Morales y José Argaez).

En general, los valores registrados aquí son semejantes a los reportados por Alcocer *et al.* (1998), donde mencionan que el rango de valores es de 1.5 a 2 mg/l, pudiendo ser hasta de menos 1 mg/l en un área cercana a Tulum. Por su parte, Matthes (2008), encontró que en cuerpos de agua subterráneos del norte del estado, la concentración fluctúa entre 0.1 a 6.2 mg/l.

Sin embargo, la presente investigación contribuye al conocimiento del comportamiento del oxígeno tanto a nivel temporal como espacial en agua subterránea, ya que los resultados demuestran que en algunos sistemas, la concentración del gas no se comporta de manera uniforme a lo largo del año; de hecho se delimitó un patrón de mayor concentración en octubre y noviembre en siete sistemas (El Poblano, Pozo el Poblano, Palmas, Casa Verde, Moscas, Sarapes Mojados y San Gervasio III).

Existe una clasificación elaborada por Schmitter-Soto *et al.* (2002), retomada por Yáñez-Mendoza *et al.* (2008) y Cervantes-Martínez (2008), sobre la naturaleza lítica o léntica en sistemas acuáticos cársticos en función de la concentración de oxígeno: los sistemas líticos poseen aguas bien oxigenadas, con columna homogénea; en cambio los lénticos, son estratificados y saturados de oxígeno en la superficie y anóxicos en la profundidad. Sin embargo, esta clasificación no aplica a las observaciones realizadas en este estudio. Aparentemente, el patrón general observado en este estudio se explica mejor por un efecto físico: la disminución en la temperatura del agua durante octubre y noviembre produce un incremento en el oxígeno disuelto (Bloesch *et al.*, 2004; Butscher y Huggenberg, 2009), en estos meses en la mayoría de los sistemas.

En cambio, en Sin Barda y Chankanaab III los valores de oxígeno registrados no se explican a la conexión subterránea. Antes ya se mencionó el aparente efecto atmosférico sobre éstos sistemas y el comportamiento del oxígeno refuerza ésta observación. Por ejemplo en Sin Barda, pese a que presentó valores bajos y relativamente constantes, aparentemente las fluctuaciones en el gas se deben a la actividad biológica, como se ha establecido en cuerpos de agua en Quintana Roo, siendo escasamente oscilantes (Gutiérrez-Aguirre y Cervantes-Martínez, 2008).

Las concentraciones bajas de oxígeno disuelto durante lluvias probablemente estén relacionadas con un mayor aporte o acarreo de materia orgánica y su subsecuente descomposición, evidencia de lo anterior es el fuerte olor del agua a ácido sulfhídrico encontrado en esta temporada (observación personal). Por otro lado, la concentración más elevada registrada en el mes de marzo (etapa temprana de secas), puede estar relacionada con la actividad fotosintética. Este tipo de comportamiento se ha reportado en sistemas cársticos de la Península de Yucatán (ver Flores-Nava, 1994; Cervantes-Martínez, 2005). Aunado a la relación con el ambiente, por la temperatura registrada, la cual provoca solubilidad de este gas y en consecuencia, su disminución (Bloesch *et al.*, 2004).

En contraste, Chankanaab III es el segundo cuerpo de agua con altos índices de oxígeno en el agua, lo cual puede aludirse a que es un sistema que permite el intercambio de gases con el medio y como explican Fagundo *et al.* (2002), cada punto muestreado se ve enriquecido de oxígeno por el periodo de precipitación.

En definitiva, los datos más informativos, que nos sugieren la existencia de agua subterránea con distintas características (a escala espacial) en la región norte de Cozumel, fueron los relacionados con la concentración de iones disueltos (conductividad eléctrica, salinidad, concentración de cloruros y sólidos totales disueltos). Esta observación se soporta por la fuerte correlación (r_s) encontrada entre estas variables. Además, como muestra la Figura 13, es posible agruparlos por su similitud en cuanto a los valores máximos promedios de conductividad eléctrica.

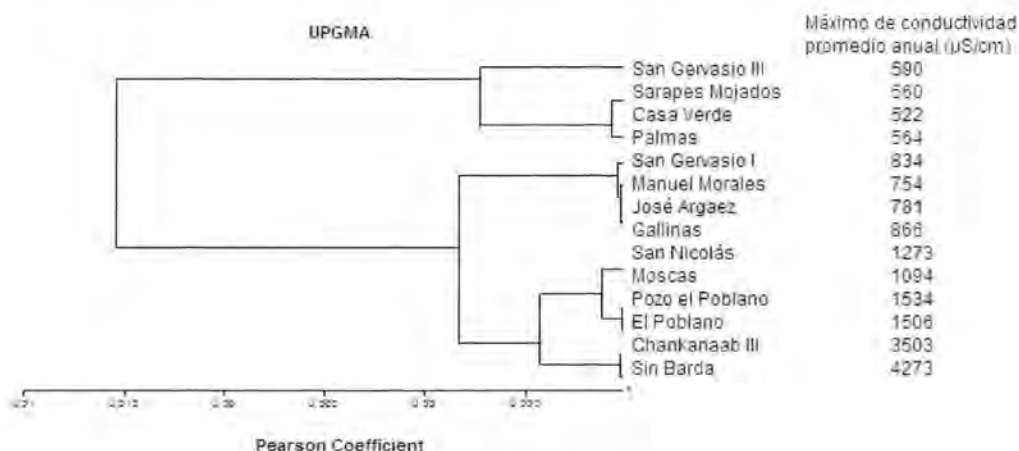


Fig. 12. Dendrograma de los sistemas estudiados.

La conductividad eléctrica, salinidad, concentración de cloruros y sólidos disueltos totales (SDT) son parámetros con relación directa, elevada y significativa, debido a que todos están relacionados con el contenido iónico del agua: la conductividad eléctrica es la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica (Mastche y Kreuzinger, 2005), la salinidad es la suma de cationes y aniones disueltos y los SDT expresan la suma total del contenido iónico y constituyen una medida indirecta de las sales disueltas (Torres-Orozco y García Calderón, 1995; Langman *et al.*, 2006). Se considera que los cloruros, son componentes típicos de las aguas subterráneas (Cerón *et al.*, 2005; Roldán-Pérez y Ramírez-Restrepo, 2008).

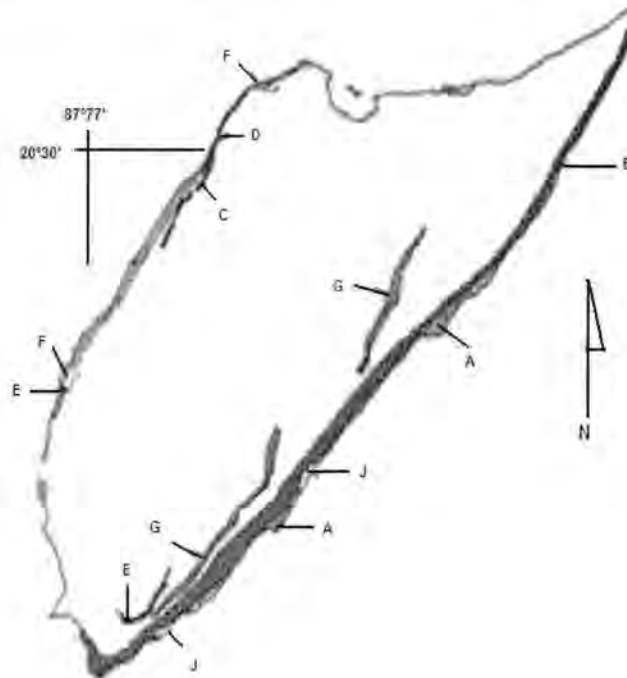
Cabe mencionar que en latitudes tropicales, la conductividad está influenciada por la geoquímica del terreno y su concentración fluctúa especialmente en la época de lluvias y secas, lo cual afecta de manera directa el contenido de iones, ya que éstos proceden de la disolución de la roca, como la evaporita (Roldán-Pérez y Ramírez-Restrepo, 2008). Por lo tanto, se considera como típico el hecho de que disminuyan estos parámetros por efecto de la dilución precedida por la mayor tasa de precipitación en la región (Reig *et al.*, 1993; Perry *et al.*, 2009); mientras que en secas incrementa el contenido iónico (Calvache y Pulido-Bosch, 1994; López-Chicano *et al.*, 2001; Jones y Bannes, 2003; Chivelet *et al.*, 2004); lo cual podría deberse al descenso en el espesor de la lente de agua, propiciando mayor concentración de iones (Beddows *et al.*, 2002; Stoessell *et al.*, 1989; Moore *et al.*, 1992).

Sin embargo, los cambios en la conductividad no están exclusivamente relacionados con la precipitación y la concentración. Además es importante considerar la localización de los sistemas en referencia con la distancia a la costa, por la posibilidad de la influencia del agua marina. Por ejemplo, en este estudio se encontró que Sin Barda y Chankanaab III presentaron los valores de concentración de iones más altos, en comparación con el resto. Estos resultados podrían estar en función de la distancia a la costa que tienen estos sistemas, la cual es menor que en el resto de los cuerpos de agua (Molina *et al.*, 2002; Gutiérrez-Aguirre *et al.*, 2008). Por otro lado, los valores en contenido iónico registrados en Sin Barda, permiten fortalecer la idea de que se trata de un cuerpo de agua altamente influenciado por el ambiente superficial y con alta actividad biológica, debido a que en la región se han reportado hasta 940 mg/l es SDT en sistemas con dichas características (Stoessell y Coke, 2006).

Sin embargo, también es importante destacar que los parámetros relacionados con el contenido iónico registrados en Moscas, son bajos, de hecho corresponden con

valores catalogados como de agua dulce. Pese a que este sistema se localiza aproximadamente a 2 km de la costa oriental de la isla, aparentemente no existe intrusión marina. Este comportamiento puede deberse a la geología del lugar, Villasuso y Méndez (2000), describen que la estructura geológica de Cozumel está constituida por rocas del Holoceno y Pleistoceno que yacen sobre rocas del Mioceno y Plioceno, lo que permite mantener una lente de agua dulce de hasta 20 m.

Por su parte, la investigación expuesta por Ward (1997) donde describe una formación de roca caliza paralela a la costa (ver Fig. 13, letra G), complementa la explicación para tales resultados, ya que es posible observar que dicha franja se encuentra a un costado del área de estudio, pudiendo actuar como barrera natural impidiendo el paso de agua salina a esta sección del acuífero, manteniendo su calidad.



A. Formaciones de coral superficiales en dirección al viento, B. formaciones de coral profundas en dirección al viento, C. formaciones de coral en dirección al sotavento, D. formaciones de moluscos y granito, E. banco interior de moluscos, F. formaciones cruzadas de piedra y granito G. formaciones paralelas al mar sumergidas de granito y piedra, J. formaciones cruzadas de calcita.

Fig. 13. Distribución de las formaciones de calizas del Pleistoceno de la Isla de Cozumel. Tomado de Ward (1997).

Con base en el análisis del comportamiento de los parámetros evaluados antes descritos, es posible hacer inferencias de áreas de recarga o zonas de importante infiltración. Esto es posible debido a que en el acuífero cárstico existen diferencias en cuanto al volumen, el flujo, la densidad que afectan los valores de las variables, provocado también por los conductos internos heterogéneos a nivel espacial en estos cuerpos de agua, debido a la morfología y litología del lugar como consecuencia de la formación del carst (Bonacci, 1995; López-Chicano *et al.*, 2001; Andreu *et al.*, 2006).

Estas características, dan lugar a que a nivel espacial con el grupo de sistemas comprendido por San Gervasio III, Sarapes Mojados, Casa Verde, Palmas, San Gervasio I, Manuel Morales, José Arguez y Gallinas, se forme un área que comparte un comportamiento semejante como temperaturas más bajas, aguas neutras o

cercanas a la neutralidad, conductividad eléctrica baja (Mayer, 1999; Cerón *et al.*, 2005) y valores de oxígeno típicos de aguas subterráneas (Matthes, 2008), pudiéndose catalogar como una zona de recarga del acuífero en Cozumel.

Características de los sistemas

Como se ha mencionado anteriormente, la precipitación incide en las condiciones que predominan en el acuífero, ya que por las características del sistema cárstico, cuya porosidad permite la rápida infiltración del agua de lluvia modifica no sólo el nivel de la columna sino que provoca otros procesos hidrogeoquímicos (Dzhamalov *et al.*, 1988; Steinich *et al.*, 1996; Perry *et al.*, 2002), que ayudan a mantener el equilibrio del sistema a través de la descarga. Se ha documentado que existe una relación significativa entre la profundidad y la temperatura (Stoessell *et al.*, 2002), influyendo sobre el volumen del agua subterránea (Bonacci, 1995; Calaforra y Pulido-Bosch, 1999) y regulando la cantidad que ha de llegar al acuífero mediante la evaporación previa en la superficie (Schwarz *et al.*, 2009).

Sin embargo, de acuerdo a los resultados, se observó que existen diferencias en el terreno dentro del área de estudio, ya que la columna de agua de algunos sistemas, verbigracia: Pozo el Poblano, Gallinas, Casa Verde y José Arguez, varió de forma simultánea con la precipitación, notándose que en septiembre, octubre y noviembre, donde hubo mayor cantidad de lluvias, concuerda con los niveles más altos de DC; el resto de los cuerpos de agua fluctuaron ligeramente. Por otro lado, San Gervasio I mostró que el periodo de recarga es diferido a la época de lluvias, ya que en secas tuvo las mayores profundidades, mientras que en nortes ésta declinó. Esto sugiere que dentro del área estudiada existen diferencias en la porosidad, haciendo que el acuífero sea más permeable en aquellas zonas que responden de manera efectiva a los cambios climáticos; mientras que hay otras, donde este proceso de infiltración se retarda, presentándose en meses posteriores, aunado a la incidencia directa el flujo subterráneo que modifica los niveles de agua dentro del acuífero (Sauro, 2003).

Límites permisibles

Los valores del análisis físico-químico, de los parámetros estimados, se cotejaron en base a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994 (ver Tabla 3) con la finalidad

de conocer cuáles variables son excedidas por cada cuerpo de agua, como se muestra en la Tabla 4 y como se aprecia, 12 de los 14 sistemas evaluados, están al límite o sobrepasan los estándares de calidad establecidos en la normatividad.

Tabla 3. Límites permisibles de elementos contenidos en el agua para uso y consumo humano de acuerdo a la NOM-127-SSA-1994.

Parámetro	Límite permisible
Cloruros (Cl ⁻)	250.00 mg/l
pH	6.5-8.5
Sólidos disueltos totales (SDT)	1000.00 mg/l

Tabla 4. Sistemas que sobrepasan los límites estipulados en la normatividad.

Sistema	pH	Cl ⁻	SDT
Sin Barda		X	X
Chankanaab III	X	X	X
El Poblano		X	
Pozo el Poblano	X	X	
Gallinas		X	
Palmas	X		
Casa Verde			
Moscas		X	
San Nicolás		X	
Sarapes Mojados			
San Gervasio I		X	
San Gervasio III	X	X	
Manuel Morales		X	
José Argaez		X	

Es posible apreciar que, a excepción de Casa Verde y Sarapes Mojados, los sistemas restantes sobrepasan los límites permisibles por lo menos en un elemento; siendo Sin

Barda y Chankanaab III, los más propensos a contaminación por sus altos valores registrados; empero, es destacable que en el primer caso, sólo en el mes de junio se llegó al máximo permitido en cuanto al pH; mientras que en el segundo cuerpo de agua, el excedente es de marzo a junio.

Por otro lado, Pozo el Poblano y San Gervasio III, traspasan dos de los tres parámetros evaluados, que se hallan dentro de la normatividad vigente (pH y Cl⁻). Finalmente, siete de los ocho sistemas restantes, coinciden en que el contenido de Cl⁻ rebasa lo previsto en materia de calidad de agua; resaltando que Palmas presenta al pH como único factor que supera tales estándares.

Lo anterior sugiere que en su conjunto, los sistemas que conforman el área considerada como de recarga, no se encuentra dentro de los estándares de calidad de acuerdo a lo señalado en la normatividad en cuanto a su contenido iónico.

Siendo la época de lluvias, la temporada donde se detectaron los índices máximos físico-químicos y de acuerdo a Hinic *et al.* (2008), Pacivic *et al.* (2006) y Andreu *et al.* (2006), es cuando el sistema es más susceptible a la contaminación, puesto que el cambio en cualquiera de los parámetros que están íntimamente relacionados afecta de forma proporcional al resto, elevando los valores de las variables que están fuera de los estándares de de calidad para uso y consumo humano (Jiménez-Cisneros, 2002).

Es preciso hacer hincapié que las altas concentraciones de SDT, como lo señalan Beddows *et al.* (1998), son un elemento clave para el estudio de la calidad del agua, pudiéndose considerar como un indicador primario de contaminación del recurso. Puesto que dentro de su análisis se incorpora el contenido tanto de iones y cationes presentes y además son elementos que están íntimamente ligados a las reacciones del carst.

En otro sentido, el manejo de acuíferos cársticos del país, cuya naturaleza provoca que el comportamiento físico-químico del agua sea distinto con respecto a otro tipo de terrenos, es difícil ya que se carece de bases que den la pauta para su uso y conservación (Cortés-Santiago, 2006).

Butscher y Huggenberger (2009), contemplan que la gestión del agua en este tipo de sistemas, es uno de los retos más importantes, sobretodo por los cambios tanto naturales como antropogénicos que se generan.

Entonces, el desarrollo sustentable del recurso hídrico, en términos de planeación y manejo debe comprender un análisis, incorporando las bases científicas, entre las redes de trabajo institucionales y legislativas (Tortajada, 2002).

CONCLUSIONES

- Se determinó que las condiciones ambientales como la precipitación y la temperatura ambiente inciden en la dinámica del acuífero, en términos físicos y químicos, la cual a su vez se encuentra influenciada por las condiciones litológicas y geológicas del lugar.
- La correlación de Spearman permitió aseverar las relaciones existentes entre las variables ambientales y físico-químicas, contribuyendo a conocer su grado de ocurrencia. Verbigracia: el contenido iónico y la temperatura ambiente se encuentran relacionados, de forma directa y significativa pero con un nivel bajo, sin embargo, este hecho no se había reportado en aguas subterráneas.
- Se comprobó que en los parámetros evaluados existen oscilaciones espacio-temporales en variables consideradas uniformes como es el caso del oxígeno disuelto. Además se halló una gama más amplia de valores en el pH que la que se tiene reportada.
- Asimismo, se observó que la conductividad eléctrica es un factor que permite catalogar a los sistemas, identificando una zona de recarga en la parte centro norte de Cozumel. Y las diferencias registradas en este parámetro responden a dos factores: 1) al tipo de terreno y 2) la distancia de los sistemas con referencia a la costa.
- Los resultados sugieren que las diferencias obtenidas en la columna de agua se deben a la geología del lugar, permitiendo mayor o menor infiltración de acuerdo a la porosidad y por tanto a la ubicación de los sistemas.
- Los cuerpos de agua que forman la zona de recarga de la Isla, sobrepasan los límites permisibles de los parámetros que considera la NOM-127-SSA-1994. Sin embargo, es necesario identificar qué factores inciden en estos resultados si son de tipo antropogénico o bien si estas condiciones son normales debido al tipo de terreno. Si éste fuera el caso, es importante contar con la normatividad *ad hoc* para acuíferos de origen cárstico, para establecer los estándares de calidad y lineamientos para su uso y conservación.

LITERATURA CITADA

- Alcocer, J., A. Lugo, L. Marin y E. Escobar. 1998. Hydrochemistry of waters from five cenotes and evaluation of their suitability of drinking water supplies, northeastern Yucatan, Mexico. *Hydrology Journal* 6: 293-301.
- Alley, W. 2007. The importance of monitoring to groundwater management. En: Holliday L., L. Marin, y H. Vaux (Eds.). *Sustainable Management of Groundwater in Mexico: Proceedings of a Workshop National Academy of Sciences* (pp. 76-85). Washington, D. C., Estados Unidos de América. The National Academic Press.
- Anda-Gutiérrez, C. 2004. *Quintana Roo: Coloso Mexicano del Caribe*. México, D. F. Noriega Editores. 215 p.
- Andreu, J., E. García, A. Carratalá, M. Sanz, A. Pulido-Bosch, J. Bellot y L. Villacampa. 2006. Influencia de los eventos de recarga en la hidrogeoquímica del acuífero del Ventós-Castelar (Alicante). *Geogaceta* 39: 91-94.
- Anónimo. 1991. *Hydrology and water resources of small islands: a practical guide*. Paris, Francia. Imprimerie de la Manutention. 329 p.
- Anónimo. 1998. *Programa de Manejo Parque Marino Nacional Arrecifes de Cozumel*. México D.F. INE. 198 p.
- Anónimo. 2002. *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Isla de Cozumel*. México, D. F. CNA. 160 p.
- Anónimo. 2003. *Programa Hidráulico Regional 2002–2006, Región XII Península de Yucatán*. México, D. F. CNA. 150 p.
- Anónimo. 2004. *Calidad de agua en sistemas costeros*. México, D. F. Instituto Nacional de Ecología (INE) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 407 p.

- Anónimo. 2006. *Manual de Evaluación de Calidad del Agua (MECA)*. Santiago de Chile. Centro Nacional de Medio Ambiente (CENMA), Facultad de Ciencias y Gobierno de Chile. 150 p.
- Anónimo. 2009. <http://www.wunderground.com/history>. Historia de Cozumel, México. Última actualización: 10 de febrero de 2009. Fecha de consulta: 10 de febrero de 2009.
- Antigüedad, I. 2000. El acuífero kárstico: Metodología de investigación y protección de sus recursos. *Sedock. Sociedad Española de Espeleología y Ciencias de Karst* 1: 1-7.
- Batllore-Sampedro, E., J. Febles-Patrón, J. Díaz-Sosa y J. González-Piedra. 2005. Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del estado de Yucatán, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 59: 74-92.
- Beddows, P., D. Ford y S. Worthington. 1998. Sustainable potable water supplies from conduit systems: Caribbean Coast, Yucatan Peninsula, Mexico. *Geological Society of America* 30: 7.
- Beddows, P., P. Smart, F. Whitaker y S. Smith. 2002. Density stratified groundwater circulation on the Caribbean Coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Karst Frontiers* 7: 129-135.
- Bloesch, J. D. Gutknecht y V. Lordache. 2004. *Hydrology and Lymnology another boundary in the Danube River Basin*. Paris, Francia. UNESCO. 102 p.
- Bonacci, O. 1990. Regionalization in karst regions. *International Association of Hydrogeologist. Regionalization in hydrology* 191: 135-147.
- Bonacci, O. 1995. Groundwater behaviour in karst: example of the Oblama spring (Croatia). *Journal Hydrology* 165: 113-134.
- Butscher C. y P. Huggenberger. 2009. Modeling the temporal variability of karst groundwater vulnerability, with implications for climate change. *Environmental Science and Technology* 43: 1665-1669.

- Cach, F. 2007. *Plan Municipal de Desarrollo Rural Sustentable (PMDRS)*. Cozumel, México. Honorable Ayuntamiento de Cozumel. 45 p.
- Calaforra, J. y A. Pulido-Bosch. 1999. Gypsum karst features as evidence of diapiric process in the Betic Cordillera, Southern Spain. *Geomorphology* 29: 251-264.
- Calvache, M. y A. Pulido-Bosch. 1994. Modeling the effects of salt-water intrusion dynamic for a coastal karstified block connected to a detrial aquifer. *Groundwater* 32: 767-777.
- Castillo-González, I. 1998. *Análisis físico-químico de aguas*. Cuaderno de prácticas. Madrid, España. Universidad Politécnica de Madrid. 60 p.
- Cerón, J., M. Moreno y M. Ollas. 2005. *Contaminación y tratamiento de aguas*. Madrid, España. Universidad de Huelva. 177 p.
- Cervantes-Martínez, A. 2005. Análisis limnológico de dos sistemas cársticos (cenotes) de la Península de Yucatán, México con énfasis en la variación espacial y temporal del zooplancton. Tesis doctoral. El Colegio de la Frontera Sur, Chetumal, México. 160 p.
- Cervantes-Martínez, A. 2007. El balance hídrico en cuerpos de agua cársticos de la Península de Yucatán: realidades y retos. *Teoría y Praxis* 3: 163-172.
- Cervantes-Martínez, A. 2008. Estudios limnológicos en sistemas cársticos. En: Mejía-Ortiz, L.M. (Ed). *Biodiversidad acuática de la Isla de Cozumel* (pp. 349-359). México, D.F. Universidad de Quintana Roo, Plaza y Valdés.
- Chivelet, J., M. Turrero, M. Muñoz y D. Domínguez. 2004. Los espeleotemas como indicadores de cambio climático. *Cubia* 7: 29-35.
- Cortés-Santiago, M. 2006. *Determinación de la calidad del agua subterránea en pozos de la Ciudad de Chetumal, Quintana Roo*. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de Chetumal, Quintana Roo, México. 96 p.
- Dzhamalov, R., I. Diordiev, N. Levedeba y T. Safronova. 1988. Particularities of groundwater run-off generation in karst region in Europe. *International*

Association of Hydrogeologists. Karst hydrology and karst environment 21: 1232-1237.

Díaz-Arenas, A. y J. Febrillet-Huertas. 1986. *Hydrology and water balance of small islands*. Paris, Francia. Internacional Hidrological Programme, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 30 p.

Enkerlin, E., G. Cano y R. Garza. 1997. *Ciencia ambiental y desarrollo sostenible*. México D. F. Internacional Thompson. 511 p.

Escolero-Fuentes, O., L. Marín, B. Steinich, J. Pacheco, A. Molina-Maldonado y M. Anzaldo. 2005. Geochemistry of the hydrogeological reserve of Merida, Yucatán, Mexico. *Geofísica Internacional 44*: 301-314.

Fagundo, J., P. González, S. Jiménez, M. Suárez, J. Fagundo-Sierra, A. González, E. Romero y D. Orihuela. 2002. Procesos geoquímicos naturales e inducidos por el hombre en acuíferos kársticos costeros. Caso de estudio: Sector hidrogeológico Güira Quivicán (Cuenca Sur de la Habana). *Revista Latino-Americana de Hidrogeología 2*: 71-79.

Flores-Nava, A. 1994. Some limnological data from five water bodies of Yucatan as a basis for aquaculture development. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Autónoma de México 21*: 87-98.

Flores-Nava, A., D. Valdéz-Lozano y M. Sánchez-Crespo. 1989. Comportamiento físico químico de una manifestación cárstica de Yucatán. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Autónoma de México 16*: 223-229.

Foster, S., R. Hirata, D. Gomes, M. D'elia, y M. Paris. 2002. *Protección de la calidad de agua subterránea*. Madrid, España. Mundi-Prensa Libros, S. A. 130 p.

García, E. 1973. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México, D. F. Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México. 246 p.

- González-Herrera, R., I. Sánchez y Pinto y J. Gamboa-Vargas. 2002. Groundwater-flow modeling in the Yucatan karstic aquifer, Mexico. *Hydrology Journal* 10: 539-552.
- Graniel, E., J. Carrillo y A. Carmona. 2003. Dispersividad de solutos en el carst de Yucatán. *Ingeniería* 6: 39-47.
- Gutiérrez-Aguirre, M. A. y A. Cervantes-Martínez. 2008. Estudios realizados e el acuífero norte de Quintana Roo, México. En Gutiérrez-Aguirre, M. y A. Cervantes-Martínez (Eds.). *Estudio geohidrológico del norte de Quintana Roo, México* (pp. 18-44). México, D. F. Universidad de Quintana Roo y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Gutiérrez-Aguirre, M. A., A. Cervantes-Martínez y L. Coronado-Álvarez. 2008. Limnology of groundwater exposures with urban influence in Cozumel island, Mexico. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 30: 493-496.
- Herrera-Silveira, J., J. Schmitter-Soto, F. Comín, E. Escobar-Briones, J. Alcocer, E. Suárez-Morales, M. Elías-Gutiérrez, V. Díaz-Arce, L. Marín y B. Steinich. 1998. Limnological characterization of aquatic ecosystems in Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 26: 1348-1351.
- Hinic, V., J. Rubinic, I. Vuckovic, I. Rusic, A. Grzetic, G. Volr, M. Ljubotina y N. Kvas. 2008. Analysis of interrelation between water quality and hydrological conditions on a small karst catchment area of sinking watercourse Trubhovica. *Earth and Environmental Science* 4: 12-21.
- Jiménez, B. y L. Marín. 2004. *El agua en México visto desde la academia*. México, D.F. Academia Mexicana de Ciencias. 411 p.
- Jiménez-Cisneros, B. 2002. *La contaminación ambiental en México*. México, D.F. Limusa-Noriega Editores.

- Jones, I. y J. Bannes. 2003. Hydrogeologic and climatic influences on spatial and interannual variation of recharge to a tropical karst island aquifer. *Water Resources Research* 39: 1253-1263.
- Kacaroglu, F. 1999. Review of groundwater pollution and protection in karst areas. *Water, air and soil pollution* 113: 337-357.
- Kalff, J. 2002. Limnology. Nueva Jersey, Estados Unidos de América. Prentice Hall. 592 p.
- Kresic, N., P. Papic y R. Golubovic. 1992. Elements of groundwater protection in a Karst Environment. *Environment geological water science* 3: 157-164.
- Langman, J., S. Falk, F. Gerbhardt y P. Blanchard. 2006. *Groundwater hydrology and water quality of the southern high plains aquifer, Cannon Air Force Base, Curry Country, New Mexico, 1994-2005*. Virginia, Estados Unidos de América. Geological Survey. 68 p.
- Larqué-Saavedra, A. 2007. How can managers and scientists facilitate the flow of Scientific Information? Perspective from México. En: L. Holliday, L. Marin y H. Vaux (Eds.). *Sustainable Management of Groundwater in Mexico: Proceedings of a Workshop National Academy of Sciences* (pp. 86-89). Washington, D. C., Estados Unidos de América. The National Academic Press.
- Lesser, J. y A. Weide. 1988. Region 25. Yucatan Peninsula. En: W. Back, J. Rosenshein y P. Seaber (Eds.). *Hidrogeology: The Geology of North America* (pp. 237-241). Colorado, Estados Unidos de América. Geological Society of America.
- León-Vizcaíno, L. 1988. *Índices de Calidad del Agua (ICA), forma de estimarlos y aplicación en la cuenca Lerma-Chapala*. México, D. F. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 98 p.
- López-Chicano, M., M. Bouamama, A. Vallejos y A. Pulido-Bosh. 2001. Factors which determine the hydrogeochemical behaviour of karstic springs. A case study from Betic Cordilleras, Spain. *Elviser Science* 16: 1179-1192.

- Lewis, M. W. Jr. 1996. Tropical lakes: how latitude makes a difference. En: Schiemer, F. y K. T. Boland (Eds.). *Perspectives in tropical Limnology* (pp. 27-42). Netherlands, Holanda. Academic Publishing.
- Marín, L., B. Steinich, J. Pacheco y O. Escolero. 2000. Hydrogeology of a contaminated sole-source karst aquifer, Mérida, Yucatán, Mexico. *Geofísica Internacional* 39: 359-365.
- Mastche, N. y N. Kreuzinger. 2005. Limnological (chemical and biological) methods: sampling analyses and data processing; species identification and concepts of river characterization (bio-indices); river typology. En: Anónimo. *Hydrology and limnology another boundary in the Danube River Basin* (pp. 22-31). Petronell, Austria. UNESCO.
- Matthes, L. 2008. Analysis and evaluation of ground and surface water quality and groundwater flow in the northern aquifer of Quintana Roo, Mexico. En Gutiérrez-Aguirre, M. y A. Cervantes-Martínez (Eds.). *Estudio geohidrológico del norte de Quintana Roo, México* (pp. 67-106). México, D. F. Universidad de Quintana Roo y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- Mayer, J. 1999. Spatial and temporal variation of groundwater chemistry in Pettyjohns cave, northwest Georgia, USA. *Journal of Cave and Karst studies* 61: 131-138.
- Molina, L., A. Vallejos, A. Pulido-Bosch y F. Sánchez-Martos. 2002. Water temperature and conductivity variability as indicators of groundwater behaviour in complex aquifer systems in the south-east of Spain. *Hidrological Process* 16: 3365-3372.
- Moore, Y., R. Stoessell y D. Easley. 1992. Fresh-water /sea-water relationship within a ground-water flow systems, northeastern coast of the Yucatan Peninsula. *Groundwater* 30: 343-350.
- Nebel, B. y R. Wright. 1999. *Ciencias ambientales: ecología y desarrollo sostenible*. México, D.F. Prentice Hall, Pearson. 610 p.
- Pavicic, A., J. Terczic y N. Berovic. 2006. Hydrogeological relationship of the Golubinka karst spring in Ljubac Bay, Damaltia, Croatia. *Geological Croatica* 59: 125-137.

- Pacheco, M. 2001. *Cerca de un manantial. El agua y el desarrollo de Quintana Roo*. Instituto Quintanarroense de la cultura. Chetumal, México. Comisión de Agua Potable y Alcantarillado (CAPA) y Gobierno del Estado de Quintana Roo. 101 p.
- Perry, E., G. Velázquez-Oliman y L. Marín. 2002. The hydrogeochemistry of the Karst Aquifer System of the Northern Yucatan Peninsula, Mexico. *International Geology Review* 44: 191-221.
- Perry, E., A. Paytan, B. Pedersen y G. Velázquez-Oliman. 2009. Groundwater geochemistry on the Yucatan Peninsula: Constrains on stratigraphy and hydrology. *Journal of Hydrology* 367: 27-40.
- Quinlan, J. 1989. *Ground-water monitoring in karst terranes: Recommended protocols and implicit assumptions*. Kentucky, Estados Unidos de América. National Park Service. 88 p.
- Ralston, M. 2000. *Groundwater management in karst terrain*. Pennsylvania, Estados Unidos de América. Department of Environmental Protection, Rachael Carson State Office Building. 13 p.
- Reig, A., C. Leibungut, M. Brand y T. Ries. 1993. Interaction between karst and porous groundwater investigated by tracer experiments. *International Association of Hydrogeologist. Tracers in hydrology* 215: 253-263.
- Roldán-Pérez, G. y J. Ramírez-Restrepo. 2008. *Fundamentos de limnología neotropical*. Bogotá, Colombia. Universidad de Antioquia. 442 p.
- Salinas, M. 2007. Modelos de regresión y correlación IV. Correlación de Spearman. *Ciencia & Trabajo* 25: 143-147.
- Sánchez y Pinto, I., R. González-Herrera y E. Perry. 2005. Hydrodynamic behaviour of the Yucatán aquifer. A perspectiva on the hydraulic conductivity estimation. *Espelune@ digital* 2: 8-22.
- Sauro, U. 2003. Doline and Sinkholes: aspects of evolution and problems of classification. *Acta carsologica* 32: 41-53.

- Schmitter-Soto, J., E. Escobar-Briones, J. Alcocer, E. Suárez-Morales, M. Elías-Gutiérrez y L. Marín. 2002a. Los cenotes de la Península de Yucatán. En: G. de Lanza-Espino y J. García-Calderón (Eds.). *Lagos y presas de México* (pp. 337-381). México, D.F. AGT Editor.
- Schmitter-Soto, J., F. Comín, E. Escobar-Briones, J. Herrera-Silveira, J. Alcocer, E. Suárez-Morales, M. Elías-Gutiérrez, V. Díaz-Arce, L. Marín y B. Steinich. 2002b. Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia* 467: 215-228.
- Schwarz, K., J. Barth, C. Postigo y P. Grathwohl. 2009. Mixing and transporting of water in karst catchment: a case study from precipitation via seepage to the spring. *Hydrology and Earth Systems Sciences* 13: 285-292.
- Silva, C. y M. Salinas. 2006. Modelos de regresión y correlación. *Ciencia & Trabajo* 22: 185-189.
- Spaw, R. 1978. *Late Pleistocene Carbonate Bank Deposition: Cozumel Island, Quintana Roo, México*. Estados Unidos de América. Transactions-Gulf Coast. Association of Geological Societies. 40 p.
- Steinich, B., G. Vázquez-Oliman, L. Marín y E. Perry. 1996. Determination of the groundwater divide in the karst aquifer of Yucatan Mexico, combining geochemical and hydrogeochemical data. *Geofísica Internacional* 35: 153-159.
- Stoessell, R., W. Ward, B. Ford y J. Schuffert. 1989. Water chemistry and CaCO₃ dissolution in the saline part of an open-flow mixing zone, coastal Yucatan Peninsula, Mexico. *Geological Society of America Bulletin* 101: 159-169.
- Stoessell, R., J. Coke y D. Easley. 2002. Localized thermal anomalies in haloclines of Coastal Yucatan sinkholes. *Groundwater* 40: 416-424.
- Stoessell, R. y J. Coke. 2006. An explanation for the Lack of a dilute freshwater lens in unconfined tropical coastal aquifers: Yucatan example. *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions* 56: 785-792.

- Torres-Orozco, R. y J. García-Calderón. 1995. *Introducción al manejo de datos limnológicos*. México, D. F. Universidad Autónoma Metropolitana. 130 p.
- Tortajada, C. 2002. *Environmental Impact Assessment of water projects in Mexico*. México, D.F. Third World Centre of water management. 21 p.
- Villasuso, M. y R. Méndez. 2000. A conceptual model of the aquifer of the Yucatan Peninsula. En: Lutz, W., L. Prieto y W. Sanderson (Eds.). *Population, development and environment of Yucatan Peninsula: from ancient maya to 2030* (pp. 120-139). Luxemburgo, Austria. International Institute for Applied Systems Analysis.
- Ward, W. 1997. Geology of coastal islands, northeastern Yucatan Peninsula. En: Vacher, H. Y T. Quinn (Eds.). *Geology and hydrogeology of Carbonate Island* (pp. 275-298). Washington, Estados Unidos de América. Elsevier Editor.
- White, W. 1993. Analysis of karst aquifer. En: Alley, W. (Ed.). *Regional groundwater quality*. (pp. 471-489). Nueva York, Estados Unidos de América. Wiley y Sons Inc.
- Wurl, G., O. Frausto y G. Chale. 2003. Ground Water Quality Research on Cozumel Island, State of Quintana Roo, Mexico. En: C. Voss y L. Konikow (Eds.). *Second International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers-Monitoring, Modeling, and Management* (pp. 1-10). Mérida, México. Salt Water Intrusion and Coastal Aquifer (SWAT).
- Yáñez-Mendoza, G., E. Zarza-González y L. M. Mejía-Ortiz. 2008. Sistemas anquihalinos. En: Mejía-Ortiz, L.M. (Ed.). *Biodiversidad acuática de la Isla de Cozumel* (pp. 49-70). México, D.F. Universidad de Quintana Roo, Plaza y Valdés.
- Zack, A. y F. Lara. 2003. Optimizing fresh groundwater withdrawals in Cozumel, Quintana Roo, Mexico – A feasibility study using scavenger wells. Mérida, México. En: C. Voss y L. Konikow (Eds.). *Second International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers-Monitoring, Modeling, and*

Management (pp. 1-10). Mérida, México. Salt Water Intrusion and Coastal Aquifer (SWAT).

Anexos

Hoja de campo

LUGAR _____

FECHA _____

Hora de llegada _____

Hora de salida _____

Sitio			
GPS Lan N			
GPS Long W			
Total profundidad			
Profundidad de la superficie al agua			
Profundidad del agua			
Oxígeno (mg/l)			
Oxígeno (%)			
Temperatura H ₂ O (°C)			
pH			
Conductividad (uS/cm)			
Salinidad (mg/l)			
Cloruros (mg/l)			
Observaciones			