



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias del Agua

CONECTIVIDAD ENTRE LA CUENCA SUPERFICIAL Y
SUBTERRÁNEA CON EL ARRECIFE DE LA ZONA
NORTE DE QUINTANA ROO.

Tesis que presenta

BRIANDA PATRICIA GUTIÉRREZ REVELES

En opción al título de

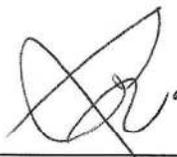
MAESTRA EN CIENCIAS DEL AGUA

Cancún, Quintana Roo, México 2022

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: _____



Brianda Patricia Gutiérrez Reveles

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.
POSGRADO EN CIENCIAS DEL AGUA



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de **Brianda Patricia Gutiérrez Reveles** titulado **“Conectividad entre la cuenca superficial y subterránea con el arrecife de la zona norte de Quintana Roo”** fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, en la línea de Seguridad Hídrica en Sistemas Socioambientales, en los laboratorios de Hidrogeología y Geomática y de Físicoquímicos del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del Dr. Gilberto Acosta González y de la Dra. Rosa María Leal Bautista, perteneciente al Programa del Posgrado en Ciencias del Agua de este Centro.

Atentamente



Dra. Cecilia Hernández Zepeda
Directora de Docencia

Cancún, Quintana Roo, México, a 19 de octubre de 2022

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca de maestría otorgada, a través del Programa Nacional de Posgrados de Calidad con el número de becario 1019627.

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), en especial a la Unidad de Ciencias del Agua por permitir el uso de los laboratorios y equipo de campo para el desarrollo de esta investigación.

Al director y codirectora de tesis Dr. Gilberto Acosta González y Dra. Rosa María Leal Bautista, por guiar esta investigación y aportar sus conocimientos necesarios para el desarrollo de este proyecto.

Al Dr. Eduardo Cejudo Espinosa, Dr. Lorenzo Álvarez Filip y la Dra. Michelle Farfán Gutiérrez quienes me apoyaron durante el desarrollo de esta investigación otorgándome las más objetivas y valiosas observaciones haciéndome mejorar todos los días. A todos los profesores de asignaturas por compartir sus conocimientos y brindarme consejos profesionales, así como de vida.

Al equipo técnico de la UCIA-CICY, encargada del laboratorio de Físico – Químicos Quim. Daniela Ortega Camacho, al técnico Jorge Carlos Peniche Pérez por su apoyo en campo. Y en especial al encargado del Laboratorio de Cromatografía y Calidad del agua M.C. José Epigmenio Bautista García, por su gran profesionalismo y apoyo incondicional tanto en campo como en laboratorio, por sus grandes consejos y por la calidad humana con la que me enseñó, resolvió mis dudas y motivó. Por su gran paciencia y confianza en mí, siempre en todo momento.

Al área Administrativa y al servicio de mantenimiento y vigilancia de la Unidad de Ciencias del Agua del CICY, por su amabilidad respeto y buen trato en apoyo a los trámites administrativos.

Agradezco a mis compañeros de la generación de maestría 2019, Dilsa, Irving por apoyarme con sus conocimientos e instruirme en los equipos de campo que necesitaba usar para el desarrollo de mi investigación y a Jaime por sus agradables charlas motivacionales e instruirnos en los trámites de la maestría.

Agradezco a mis compañeros de maestría, por su apoyo y respeto. Aprendí mucho de las cualidades de cada uno de ellos y de la visión de sus vidas, tomé algunos de sus consejos y los llevé a cabo para emprender en mi futuro. Juan Carlos, Andy, Jass, Dino, Gerry y Petter, tienen cosas maravillosas en ustedes, gracias por lo que dejaron en mi corazón, deseo que la vida siempre les deseo lo mejor.

Agradezco a la directora del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM), María del Carmen García Rivas, por otorgarnos el permiso de coleccionar muestras de agua en la Zona Del arrecife.

Les agradezco a los amigos que gané en la maestría Altys, Itzel, Pantoja y a todos con los que compartí espacio en los laboratorios y edificios comunes “Una buena charla en la comida es a veces lo que necesitas para sostenerte y volver al ruedo”.

Agradezco a mis padres por traerme a este mundo y la oportunidad de vivir este sueño. A mi madre por escucharme y alentarme a creer en mí, aunque tuviera miedo. A mi padre por ejemplificarme con amor y humildad que el conocimiento también viene de la experiencia.

Agradezco con todo mi corazón a lo más importante de mi vida, a la familia que he formado (mi esposo Dave y mi hija Amelie), por apoyarme en cada momento con su paciencia, admiración y respeto.

DEDICATORIA

A mi compañero de aventuras y proyectos de vida, mi DAVE. Tu apoyo incondicional fue fundamental para cumplir este sueño.

Dedico este trabajo especialmente a mi amada hija Amelie, quien ha sido mi mayor motivación para lograr esta meta, provocando el deseo de ser un buen ejemplo para ella.

“La nueva tarea no consiste en llegar a un puerto seguro (porque ya no hay puntos de arribada, dado a que toda vida individual está constitutivamente inconclusa y toda civilización está esencialmente inacabada), sino navegar hacia lo infinito. No se debe desear el regreso a las aguas tranquilas de un puerto, sino seguir adelante, aunque no conozcamos la meta y aunque las tempestades anteriores hayan destrozado la nave” (Bodei, 2010).

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1	4
ANTECEDENTES	4
1.1 Marco conceptual de la conectividad entre ecosistemas y su evaluación.	4
1.1.1 Definición y conceptualización de la conectividad ecológica.....	4
1.1.2 Conectividad de ecosistemas.	4
1.1.3 Conectividad hidrológica e hidrogeológica.....	5
1.1.4 Evaluación de la conectividad hidrogeológica.....	7
1.1.5 Herramientas hidrogeológicas.	10
1.1.6 Sistemas de flujo- Toth.....	13
1.1.7 Características fisicoquímicas importantes en el agua subterránea.....	15
1.1.8 Elementos que modifican la calidad natural del agua.	18
1.2 Marco Hidro-geo ecológico.....	20
1.2.1 Cuenca de la península de Yucatán (PY).....	20
1.2.2 Condiciones geológicas de la península de Yucatán (PY).....	23
1.2.3 Condiciones hidrogeológicas de la península de Yucatán (PY).....	23
1.2.4 Condiciones hidrogeoquímicas del comportamiento de flujos en la península de Yucatán (PY).....	26
1.2.5 Acuífero kárstico costero.	27
1.2.6 Flujo de poros o “Seepage”.	28
1.3 Estudios previos de conectividad hidrogeológica.....	29
1.3.1 Ejemplos de estudios a nivel mundial.....	29
1.3.2 Ejemplo de estudios en la península de Yucatán (PY).	30
1.3.3 Ejemplos de estudios en la zona norte de Quintana Roo.....	31
JUSTIFICACIÓN	33
HIPÓTESIS	33
OBJETIVO GENERAL.....	33
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	33
CAPITULO 2	35
METODOLOGÍA.....	35
2.1 Área de estudio.	35

2.1.1	Clima	36
2.1.2	Características geológicas de la zona de estudio.	37
2.1.3	Características hidrogeológicas de la zona de estudio.	37
2.1.4	Ecosistemas de la zona de estudio.	38
2.2	Estrategias metodológicas.....	38
2.3	Muestreo.	39
2.3.1	Zona A.....	42
2.3.2	Zona B.....	44
2.3.3	Zona C.	45
2.3.3	Zona D y E.	46
2.4	Descargas subterráneas (DAS) al mar en Puerto Morelos.	47
2.5	Mareas predominantes en el área de estudio.....	48
2.6	Medición de parámetros Físicoquímicos (in situ) y colecta de muestras de agua.	49
2.6.1	Muestreo Zona A.	51
2.6.2	Perfil en la zona A.	51
2.6.3	Muestreo Zona B.	51
2.6.4	Muestreo Zona C.....	52
2.6.5	Muestreo Zona D.....	54
2.7	Colecta de datos topográficos y nivel freático.....	58
2.8	Análisis de laboratorio.	59
2.8.1	Análisis microbiológicos.....	59
2.8.2	Análisis de Nutrientes.	60
2.8.3	Análisis de Alcalinidad.....	60
2.8.4	Análisis de Elementos Mayores.....	61
2.9	Análisis de Datos.....	61
CAPÍTULO 3		63
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		63
3.1	Resultados de parámetros físicoquímicos in situ.	63
3.1.1	Temperatura.....	67
3.1.2	pH.	68
3.1.3	Conductividad eléctrica (CE).	68
3.2	Distribución temporal de los valores de los parámetros físicoquímicos (Temperatura, pH y Conductividad eléctrica) in situ.	70
3.3.	Resultados de parámetros físicoquímicos in situ de Perfiles.....	74

3.4 Resultados de Alcalinidad.	78
3.4.1 Resultados de Alcalinidad de los Perfiles de la Zona A (Cenote Verde Lucero) y Zona D (Sitio 8. Laguna Arrecifal).	78
3.5 Resultados de Elementos Mayores.	79
3.5.1 Diagramas de Durov.	82
3.5.2 Elementos Mayores en los Perfiles realizados en la Zona A y Zona D.	86
3.6 Resultados de Nutrientes: nitrógeno, sílice y fósforo.	87
3.7 Resultados de Nutrientes de los Perfiles Zona A (Cenote Verde Lucero) y Zona D (Sitio 8. Laguna Arrecifal).	93
3.8 Resultados de indicadores Bacteriológicos.	95
3.8.1 Resultados bacteriológicos en los Perfiles de la Zona A (Sitio 3. Cenote Verde Lucero) y Zona D (Sitio 8. Perfil Laguna Arrecifal).	97
3.9 Dirección de flujo subterráneo preferencial (Herramientas hidrogeológicas).	99
3.10 Análisis de Datos.	100
DISCUSIÓN	103
3.11 Parámetros fisicoquímicos in situ.	104
3.12 Perfiles (Zona D y E).	111
3.13 Alcalinidad.	113
3.14 Nutrientes.	116
3.15 Análisis de Datos.	120
CONCLUSIONES.	122
BIBLIOGRAFÍA	124
ANEXO	136

LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1. Información general de los sitios de muestreo por zonas (ambas temporadas).....	41
Tabla 2.2. Valores estadísticos de las mareas en Puerto Morelos y los datos en el día de muestreo.	48
Tabla 2.3. Distancia de los puntos en la Zona D y E, desde la línea de costa.....	56
Tabla 2.4. Profundidad de muestreo en la Zona D y E.	57
Tabla 3.1. Parámetros fisicoquímicos de los sitios de estudio, incluidos en cada zona en la temporada de Secas.	63
Tabla 3.2. Parámetros fisicoquímicos de cada sitio de estudio, incluidos en cada zona en la temporada de Lluvias.	64
Tabla 3.3. Resultados de la alcalinidad de las cinco zonas (promedios de tres muestras del mismo sitio), expresado como meq HCO ₃ /L.	78
Tabla 3.4. Alcalinidad de perfiles en la Zona A y D.	79
Tabla 3.5. Concentraciones en de los cationes y aniones de las muestras de agua colectadas en temporadas de secas y la conductividad eléctrica (CE).....	80
Tabla 3.6. Concentraciones en de los cationes y aniones de las muestras de agua colectadas en temporadas de lluvias y la conductividad eléctrica (CE).	81
Tabla 3.7. Concentraciones de los cationes y aniones de las muestras de agua colectadas los Perfiles realizados en la Zona A y Zona D.....	86
Tabla 3.8. Concentraciones de nutrientes en el agua de los sitios de muestreo, temporada de Secas. Mostrado como nitrógeno de cada especie, el fósforo se muestra como anión de fosfato.	88
Tabla 3.9. Concentraciones de nutrientes en el agua de los sitios de muestreo, temporada de Lluvias. Mostrado como nitrógeno de cada especie, el fósforo se muestra como anión de fosfato.	88
Tabla 3.10. Tabla de indicadores microbiológicos (temporada de Secas). Coliformes y/o enterococos detectados en las muestras de agua de los sitios de muestreo. Se resaltan con asterisco las concentraciones sobresalientes de cada zona.....	95

Tabla 3.11. Tabla de indicadores microbiológicos (temporada de Lluvias). Coliformes y/o enterococos detectados en las muestras de agua de los sitios de muestreo. Se resaltan con asterisco las concentraciones sobresalientes de cada zona..... 96

Tabla 3.12. Tabla de indicadores microbiológicos (Perfiles). Coliformes y/o enterococos detectados en las muestras de agua de los sitios de muestreo. 97

Tabla 3.13. Cálculo de las cargas hidráulicas con el datum obtenido con GPS y el nivel estático (Sitios en la porción continental y la playa)..... 99

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de las escalas espaciales y la relación con los factores biofísicos, Modificado de Vidal-Abarca et al. (2016).	6
Figura 1.2. Diagrama de cargas hidráulicas, sistema en equilibrio o estático. Modificado de Sánchez, (2017).	11
Figura 1.3. Experimento de Darcy, fuente Padilla Francisco, Geología Aplicada 1er curso, Ingeniería Geológica, Universidad de A Coruña, curso 2012-2013.	12
Figura 1.4. Esquema de los flujos modelo de Tóth, tomado de Rabadán, (2019).	14
Figura 1.5. a) Mapa Región Hidrológico-Administrativa XII PY. Mapa elaborado con datos de CONAGUA y CONABIO (2022) y b) Mapa de los acuíferos de la península de Yucatán. Tomado de CONAGUA, (2020).	23
Figura 1.6. Mapas de regiones hidrogeológicas, tomada de CONAGUA (2020).	25
Figura 1.7. Mapa de trayectorias de flujos subterráneos a escala regional de la península de Yucatán. Tomado de Bauer et al., (2011).	26
Figura 1.8. Acuífero kárstico costero, tomado de Herrera-Silveira et al., (2013).	27
Figura 1.9. a) Modelo conceptual del Flujo de poros o seepage en la costa, Tomado de More, (2010) y b) flujo de poro escala amplia (elaboración propia).	28
Figura 2.1. Mapa del municipio de Puerto Morelos, elaboración propia.	35
Figura 2.2. Climograma del Estado de Quintana Roo en el año de estudio datos obtenidos de SMN, (2021).	36
Figura 2.3. Diagrama de estrategias metodológicas para cumplir los objetivos propuestos en el estudio.....	39
Figura 2.4. Mapa del área de estudio.	40
Figura 2.5. Descripción de los sitios y su correspondiente zona en el transecto espacial de este estudio.....	41
Figura 2.6. Dolinas inundadas en Puerto Morelos, Quintana Roo. Identificados como: a (Cenote Verde Lucero), b (Cenote Laguna Corchalito o Cenote Laguna), c (Cenote Domo). Fotos: Brianda Patricia Gutiérrez Reveles.	43
Figura 2.7. Mapa del Sitio 2. Manglar (Puerto Morelos) elaboración propia.	45
Figura 2.8. Zona C.....	45
Figura 2.9. Diagrama del perfil de arrecife del área de estudio (Puerto Morelos). Zona I: laguna arrecifal y zona posterior; zona II: cresta arrecifal; zona III: Zona Frontal con plataforma arenosa, tomado y modificado de (Carabias-Lillo et al., 2000).	46

Figura 2.10. Arrecife de Puerto Morelos (Los Jardines). Foto: Brianda Gutiérrez.	47
Figura 2.11. Descarga submarina de agua subterránea (SGD) en el transecto. Google Earth y foto propia.	48
Figura 2.12. Esquema conceptual del plan de muestreo.	50
Figura 2.14. Colecta de muestra de agua Sitio 2. Manglar.	52
Figura 2.15. Esquema de los pozos de observación excavados en la playa.....	53
Figura 2.16. Medida de parámetros fisicoquímicos <i>in situ</i> , (a) Sitio 1. Pozo Niños Héroes y (b) Sitio 7. Playa (Pozos de observación).....	54
Figura 2.17. Posición sonda multiparamétrica HYDROLAB ® DS5 (a) en el Sitio 5. Arrecife y (b) en el Sitio 6. SGD.....	55
Figura 2.18. Esquema transversal de muestreo de la Zona C, D y E.....	56
Figura 2.19. Colecta de muestra de agua en el mar.	57
Figura 2.20. Medición de datum de referencia y nivel freático.	59
Figura 2.21. Procedimiento de análisis de alcalinidad.....	61
Figura 3.1. Gráficas de parámetros fisicoquímicos medidos in situ de la temporada de secas. a) temperatura, b) pH y c) conductividad eléctrica. Variación espacial de los parámetros fisicoquímicos en los ambientes muestreados y formación de grupos (I y II).	66
Figura 3.2. Gráficas de parámetros fisicoquímicos medidos in situ de la temporada de lluvias. a) temperatura, b) pH y c) conductividad eléctrica. Variación espacial de los parámetros fisicoquímicos en los ambientes muestreados y formación de grupos (I y II).	67
Figura 3.3. Resumen de datos de cada sitio en cada zona, los valores en negro representan los rangos de temporada de secas y los valores en rojo representan los rangos de temporada de lluvias.	70
Figura 3.4. Gráficas de parámetros fisicoquímicos in situ: a) temperatura, b) pH y c) conductividad eléctrica (CE), en las temporadas de secas y lluvias.	73
Figura 3.5. Perfiles del Sitio 3. Cenote Verde Lucero: a) Temperatura; b) pH; c) conductividad eléctrica (CE).....	75
Figura 3.6. Perfiles de la porción marina del transecto definido desde la línea de costa hasta el sitio 5. Arrecife: a) Perfil de Temperatura; b) Perfil de pH y c) Perfil de conductividad eléctrica (CE).....	77
Figura 3.7. Diagramas de Durov a) temporada de secas b) temporada de lluvias.	84
Figura 3.8. Relaciones iónicas temporada de secas.....	85
Figura 3.9. Relaciones iónicas temporada de lluvias.	86

Figura 3.10. Distribución espacial de los compuestos nitrogenados a) temporada de secas, b) temporada de lluvias.....	91
Figura 3.11. Distribución espacial de sílice.....	92
Figura 3.12. Gráficas nutrientes. a) Nitrito, b) Nitrato, c) Sílice. Zona A (Perfil de Sitio 3. Cenote Verde Lucero).....	93
Figura 3.13. Gráficas de Nutrientes en la columna de agua de los perfiles definidos en el Sitio 8. Laguna Arrecifal a) Nitrato y b) Sílice.....	95
Figura 3.14. Mapa de isolíneas de cargas hidráulicas del área de estudio	100
Figura 3.15. Clúster de las muestras colectadas en temporada de secas en los sitios del transecto, línea roja indica "línea fenotípica" marcada para definir los grupos a) secas y b) lluvias.	103
Figura 3.16. Escalado multidimensional no métrico (nMDS) con clústeres superpuestos del análisis de clústeres a un nivel de similitud 70 a) temporada de secas y b) temporada de lluvias.	103
Figura 3.17. Pozos de observación en el Sitio 7. Playa, con nivel de marea, conductividades eléctricas y salinidades a) temporada de secas y b) temporada de lluvias.	110
Figura 3.18. Enterococos de la zona D y E (temporada de lluvias).....	120
Figura 3.19. Aquí se presentan la importancia de las condiciones hidrogeoquímicas que relacionan las zonas por su similitud respecto a la distancia a costa, así como el comportamiento que se presenta de mezcla en la zona E relacionada a los flujos DAS (SGD) pero muy importante el de la zona C que refleja un comportamiento de mezcla a escala de matriz.....	122

GLOSARIO

DAS: Descarga de agua subterránea

SGD: Descarga submarina de agua subterránea, siglas en inglés.

Seepage: desplazamiento del agua a través de material poroso (matriz) a baja velocidad en comparación con las DAS o SGD.

h : carga hidráulica total

RESUMEN

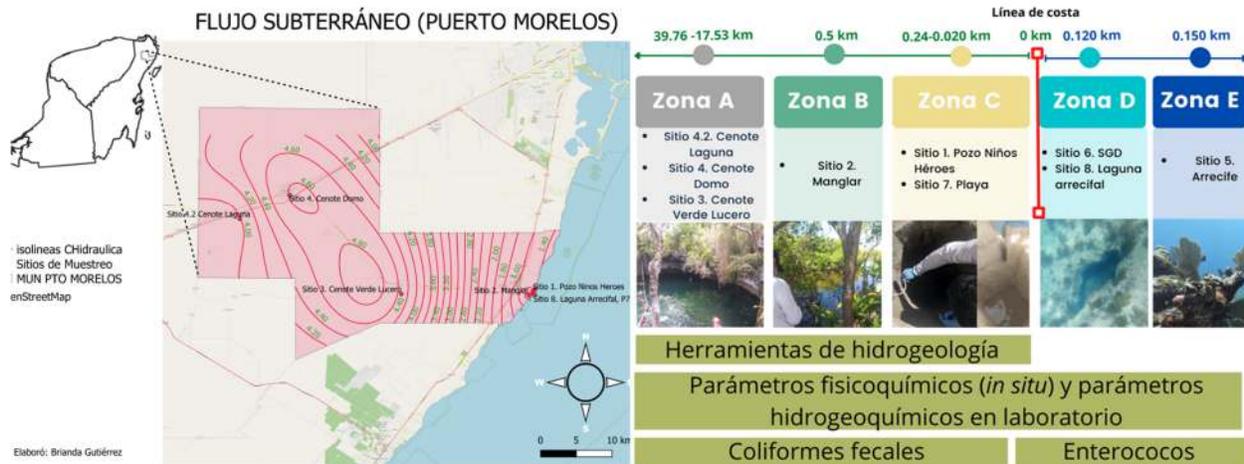
La península de Yucatán está fuertemente influenciada por la interacción física del sistema geológico kárstico, el cual define sus cuencas y regiones hidrogeológicas, además de las características hidrodinámicas que determinan las direcciones de los flujos de agua subterránea y su relación con los sistemas costeros. Este trabajo tuvo como objetivo, obtener evidencias de la conectividad hidrogeológica mediante la evaluación de la interacción de los flujos de agua subterránea continuos y de baja escala del continente al mar, es decir los que presentan una velocidad de poro diferentes a las de descargas submarinas. El área de estudio se definió en un transecto perpendicular a la costa, al norte de Quintana Roo (Puerto Morelos), donde se colectaron muestras de agua de pozos, dolinas inundadas (cenotes), en el manglar, la zona costera (playa) y dentro de la laguna arrecifal. Se aplicaron metodologías de hidrogeología física para determinar cargas hidráulicas y de Hidrogeoquímica para determinar características y procesos químicos, además se analizaron nutrientes y bacterias para verificar las condiciones del agua en los sitios de estudio. Los resultados confirman la importancia de la relación de los flujos de aguas subterráneas en las descargas submarinas de aguas subterráneas (SGD), como ha sido señalado por otros autores, pero sugieren la importancia de la contribución de flujos más cortos a menor profundidad. Estos flujos se identifican por la influencia de los flujos de escala de poros en función de la proporción de elementos químicos que corresponden a las descargas de los flujos de aguas subterráneas. Adicionalmente, la variación de las concentraciones de nutrientes y la presencia de bacterias indican la posible interacción de flujos más cortos a menor profundidad (flujos locales). Mediante los perfiles definidos en la porción marina, también se logra identificar que las descargas subterráneas a través de la infiltración que se da en los poros del frente de playa (seepage), están ocurriendo de manera continua y pueden trasladar las condiciones del agua subterránea con características locales hacia el arrecife. Es decir, la zona de laguna arrecifal puede estar recibiendo aporte de agua subterránea tanto de la descarga como de la infiltración de poro.

ABSTRACT

The Yucatan Peninsula is highly influenced by the physical interaction of the karst geological system that defines the basin and hydrogeological regions. Furthermore, hydrodynamic characteristics determine the directions of groundwater flows and the relationship with the coastal systems. This work aims to obtain evidence of hydrogeological connectivity evaluating the interaction of continuous and low-scale groundwater flows from coastline areas to the sea. In other words, flows that have a pore velocity and flows of submarine groundwater discharge. The study area was in the north of Quintana Roo (Puerto Morelos). The water samples were collected from wells and sinkholes (cenotes), mangrove, the beach and within the reef lagoon located in a transect perpendicular to the coast. Also, physical hydrogeological and hydrogeochemical methodologies were applied. The results confirm the importance of the relationship of groundwater flows in submarine groundwater discharges (SGD), as has been pointed out by other authors, but suggest the importance of the contribution of shorter flows at less depth. These flows are identified by the influence of pore scale flows based on the proportion of chemical elements that correspond to the discharges of groundwater flows. Additionally, the variation of nutrient concentrations and the presence of bacteria indicate the possible interaction of shorter flows at less depth (local flows). Through the profiles defined in the water column of the reef lagoon, it is possible to identify underground discharges through continuously occurring infiltration in the pores of the beach front (seepage), which can transport groundwater conditions with local characteristics to the reef. Thus, the reef lagoon area may be receiving groundwater input from both submarine groundwater discharge (SGD) and groundwater through pore infiltration (seepage).

RESUMEN GRÁFICO

Conectividad entre la cuenca superficial y subterránea con el arrecife



Research Highlights (Conectividad entre la cuenca superficial y subterránea con el arrecife de la zona norte de Quintana Roo).

- Ecosistemas costeros en la península de Yucatán dependientes del agua subterránea.
 - Flujo subterráneo
 - características hidrogeoquímicas del acuífero kárstico costero
 - Calidad natural del agua en ecosistemas costeros.
- Conectividad hidrogeológica identificada con puntos de alta descarga.

INTRODUCCIÓN

La interconectividad hidrogeológica en las costas de la península de Yucatán demuestra que hay dependencia de los sistemas costeros del y al agua subterránea, controlados por el ciclo hidrológico, las características físicas del sistema geológico tipo kárstico y sus procesos dinámicos que responden a fenómenos de diferentes escalas, tanto temporales como espaciales (Herrera-Silveira, 2006). En la interconectividad hidrogeológica se transporta una cantidad considerable de elementos químicos tales como nutrientes y contaminantes desde el continente hacia los ecosistemas marinos, a través del agua subterránea y puede influir en las características hidrogeoquímicas de los ambientes costeros y marinos (Hernández-Terrones et al., 2014).

En la porción oriental de la península de Yucatán (PY), se encuentran una gran variedad de ecosistemas formando un gradiente natural desde el continente hasta los ambientes marinos. En la porción continental, las dolinas inundadas o coloquialmente conocidas como “cenotes” son depresiones de origen kárstico producto del colapso de formaciones geológicas moldeadas por disolución de la roca con el agua, las cuales se han expuesto a la superficie (Beddows et al., 2007). Las dolinas inundadas o cenotes, al ser estructuras geológicas subterráneas, permiten la circulación de agua subterránea con otras dolinas, al igual que con otros ecosistemas como son las lagunas costeras, humedales y manglares (Schmitter-Soto et al., 2002).

Por su parte, los manglares son ecosistemas que se desarrollan en las zonas de transición entre la Zona Costera y los ambientes marinos de regiones tropicales y subtropicales, son un tipo de vegetación arbórea y arbustiva que por sus condiciones morfológicas y las características biológicas que presentan, pueden desarrollarse en condiciones de agua subterránea, salobre o saladas (Alves d’Acampora, 2018). Los manglares proveen de servicios ambientales a las zonas costeras, desde protección contra los efectos provocados por los huracanes, y en sentido de continente hacia el mar, se consideran que son filtros naturales del agua subterránea que llega a los ecosistemas marinos (Alves d’Acampora, 2018).

Otro ecosistema en la región costera que responden a la influencia del agua subterránea son los arrecifes de coral. Los arrecifes de coral mantienen su importancia por la gran diversidad biológica que contienen y los servicios ecosistémicos que aportan a las zonas costeras, entre los que destacan: protección de playas frente a fuertes oleajes, provisión alimentaria y paisajes turísticos

de belleza inigualable (Acosta-González, 2013). Mantienen una complejidad estructural y biológica del hábitat que los componen, por lo que son de suma importancia.

El flujo preferencial a escala regional en la PY es de manera transversal a la costa y puede tomar direcciones de SO-NE en zonas que presentan mayor altitud y O-E en algunas otras zonas, hasta llegar a la costa (Marín et al., 2004, Perry et al., 2002; JICA, 2004; Gondwe et al., 2010; Bauer-Gottwein et al., 2011; Sánchez-Sánchez, 2015; CONAGUA, 2015). Por lo que las descargas de agua subterránea (DAS) son percibidas en diversos puntos de la Zona Costera de la PY, provenientes de diferentes fuentes y en cantidades variables.

En las zonas costeras se establece que el flujo preferencial a través de una escala predominantemente de porosidad secundaria mediante fracturas (Zamora-Luria, 2020), además de la mezcla de agua dulce y marina a través de sedimentos permeables que reciben filtraciones de agua subterránea basal a los ecosistemas marinos (Zamora et al., 2017), como disposición final de las descargas al mar. Las DAS pueden desembocar directamente al mar, mediante descargas submarinas de agua subterránea (SGD) (Bauer-Gottwein et al., 2011), o a través de flujos continuos que mantienen trayectorias preferenciales a través de los sedimentos permeables por el efecto seepage o flujo de poros (Zamora et al., 2017).

Indicadores como el nivel freático, las características del acuífero, intrusión salina, características del agua, características del terreno y la interacción del agua superficial-subterránea permiten evaluar las condiciones del sistema, indicando el grado de la conectividad de los ecosistemas (Rohde et al., 2018). Por lo que, dado la relevancia que tiene el agua subterránea como un medio de conectividad entre ecosistemas de la zona costera, este trabajo tiene como objetivo evidenciar una conectividad hidrogeología analizando las interacciones de los flujos con los sistemas naturales costeros desde el continente hasta el mar, mediante la comprobación de la dirección de flujos subterráneos, así como la evaluación de las propiedades fisicoquímicas, hidrogeoquímicas y bacteriológicas en los diferentes cuerpos de agua que componen los ecosistemas costeros.

El trabajo se desarrolló en la zona costera del norte de Quintana Roo (municipio de Puerto Morelos), para lo cual, se realizó una evaluación topográfica para identificar las curvas de nivel y la correlación con el flujo subterráneo en un transecto de oeste a este, que incluyó dolinas inundadas (cenotes), manglar, pozos en la zona costera y playa.

Así mismo, se colectaron muestras de agua en dolinas inundadas (cenotes), pozos, manglar, flujos someros del acuífero superficial en el frente de la playa, descargas submarinas de agua subterránea (SGD) y laguna arrecifal para identificar si la proporción de elementos químicos corresponde en proporción a descargas de flujo de agua subterránea, así como determinar las variaciones en las concentraciones de nutrientes y la presencia de bacterias en el agua subterránea de la cuenca al arrecife de coral.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Marco conceptual de la conectividad entre ecosistemas y su evaluación.

En este capítulo se abordarán los conceptos de la conectividad entre ecosistemas, su clasificación, sus características y la relación que mantienen con el sistema geológico, el agua subterránea y los ecosistemas costeros. Del mismo modo, se enlistarán las herramientas que se proponen para su análisis, específicamente para este caso de estudio.

1.1.1 Definición y conceptualización de la conectividad ecológica.

La definición de conectividad más convencional fue introducida formalmente por Taylor et al., en 1993, y dice así “Es el grado en el que el territorio facilita o impide el movimiento de los elementos (especies e individuos) entre distintos parches de hábitat”. Tal definición hace referencia a la “conectividad del paisaje” y se enfoca particularmente a las conexiones de hábitats en medios terrestres.

1.1.2 Conectividad de ecosistemas.

La conectividad entre ecosistemas implica el flujo o transporte de materia y energía, establecidos como elementos o productos a través de vías de conexión entre un ecosistema a otro (Taylor et al., 1993). Los elementos vivos (organismos), pueden compartir características biológicas similares o ser diferentes, los elementos no vivos como sedimentos, contaminantes u otros compuestos inorgánicos también pueden estar implicados en el flujo de la conectividad (Sale et al., 2010).

La conectividad ecológica, desde un aspecto general vista a macro escala, se clasifica en dos tipos: conectividad estructural y conectividad funcional. En la conectividad estructural, se establece la composición de los elementos del paisaje o el territorio, la conectividad estructural está en función de las características espaciales del paisaje y normalmente se calculan con herramientas de medición (Burel y Baudry, 2003; Baguette y Van Dyck, 2007; Taylor et al., 2006). La conectividad funcional, se basa en las relaciones de los organismos con la estructura espacial del paisaje (Taylor et al., 2006). Se mide por la capacidad de dispersión y transferencia de

elementos que cada organismo requiere para desplazarse de un hábitat a otro. Está en función de las habilidades de cada especie para transferir materia, energía y llevar a cabo sus procesos biológicos (Tischendorf y Fahrig, 2000; Taylor et al., 2006).

La conectividad estructural relacionada con el agua responde a las características físicas del paisaje (macro escala), usando el agua como el elemento que se moviliza a través de los medios que conecten a los ecosistemas. Puede ser la clave para entender los procesos que influyen en el comportamiento de la conectividad, ya que trata de explicar movimientos y velocidades (Espinosa et al., 2020).

1.1.3 Conectividad hidrológica e hidrogeológica.

La conectividad hidrológica se evalúa en cuerpos de agua o grupos de ellos que mantienen las mismas características, por ejemplo, cuencas hidrogeológicas, ríos, canales y cenotes o cuevas en los sistemas kársticos. Donde se cuantifica los flujos de agua, así como los procesos tanto físicos y climáticos que controla su distribución y abundancia en el medio físico. Además de explicar el movimiento de elementos como nutrientes y contaminantes (Espinosa et al., 2020).

La conectividad hidrológica, para su análisis y evolución se dispone en tres dimensiones: longitudinales, verticales y laterales, en referencia a variaciones espaciales. Las escalas implicadas en la conectividad hidrológica (Figura 1.1) a niveles locales, regionales hasta globales hace referencia a la escala espacial (Pringle, 2001), la escala temporal está en función del clima y de los hidro-periodos de los ecosistemas involucrados (Vidal-Abarca, 2016).

Las variables de la escala espacial, se derivan para cada elemento donde encuentra su origen y su conexión con otra variable, por ejemplo, en la componente vertical se efectúa con la interacción de la porción de agua superficial y los flujos del agua subterránea, y en la componente lateral se delimita los flujos haciendo un efecto de barrera natural, de filtro (cuando se controla el paso de algunos elementos como los nutrientes), de fuente (representa a la transición del cauce principal y su descarga a otro cuerpo de agua) y de sumidero (en el caso de la materia orgánica) (Ward, 1989; Vidal-Abarca, 2016).

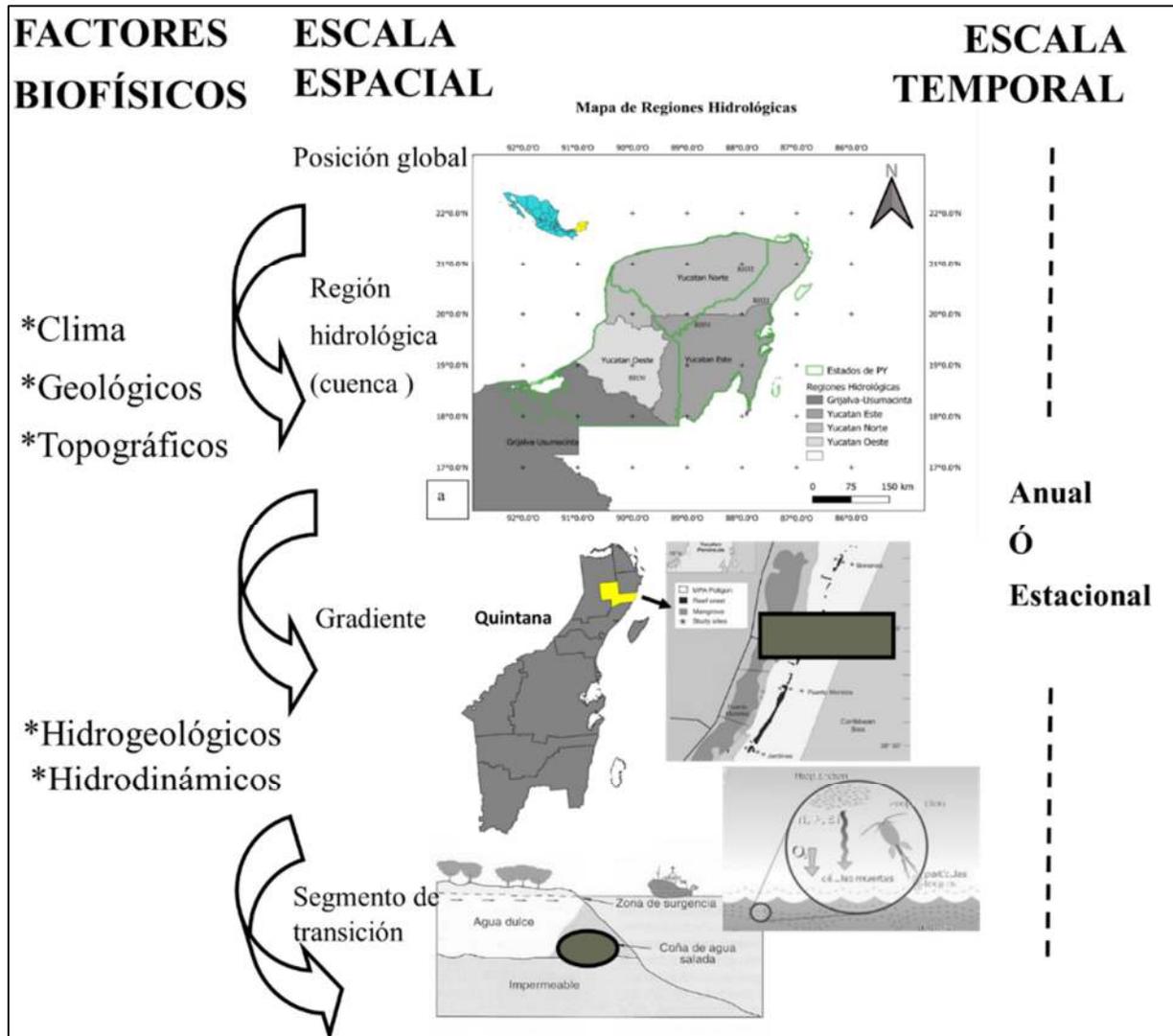


Figura 1.1. Esquema de las escalas espaciales y la relación con los factores biofísicos, Modificado de Vidal-Abarca et al. (2016).

La conectividad hidrológica debe ser evaluada dentro de los elementos que conforman el ciclo hidrológico (Pringle, 2001; Freeman et al., 2007). El volumen, la variabilidad y el comportamiento de los flujos hidrológicos definen en el grado de conectividad hidrológica entre los ecosistemas.

Más allá de que la conectividad hidrológica tenga como punto de señalización un río, hay zonas caracterizadas por un régimen de captación subterráneo mucho más importante en magnitud que un flujo superficial. Por lo que, la conectividad hidrológica, también puede presentarse en la

circulación del agua subterránea como parte del ciclo hidrológico en la cual ocurre el movimiento de energía y materia clasificados como elementos o productos a través de las rocas del acuífero (Arias-González et al., 2016).

La capacidad de la transmisión del agua subterránea se determina por las características físicas del medio de transferencia, que en este caso son la porosidad y permeabilidad del material geológico por donde fluye el agua subterránea (Lal y Shukla, 2004), influenciados por sus comportamientos hidrodinámicos correspondientes, los cuales facilitan u obstaculizan la conexión hidrológica entre ecosistemas.

La conectividad hidrogeológica está influenciada por las características geológicas, hidrodinámicas y químicas del medio geológico donde se movilizan sus flujos y es un elemento fundamental para entender la dinámica y procesos biológicos, químicos y ecológicos de los ecosistemas que estén integrados en el recorrido del agua. La conectividad hidrogeológica implica el movimiento de elementos o productos, así como contaminantes a través del agua subterránea, es por ello, que las acciones que generen fuentes de contaminación antropogénica mantenidas en las zonas de recarga tendrán gran influencia en las condiciones de la calidad del agua que los ecosistemas receptores reciban (Orozco-Uribe, 2020).

En los ecosistemas costeros como zonas de transición, la conectividad hidrológica puede ser vista en base a los fundamentos de la conectividad estructural, representando la continuidad natural de ecosistemas: desde los cenotes que corresponden a los cuerpos de agua subterránea, las selvas, manglares, cuerpos de agua superficiales como son las lagunas costeras, hasta llegar a los ecosistemas marinos, dentro de los que destacan los pastos marinos y arrecifes (Falcón et al., 2020). En las zonas costeras, la conectividad hidrogeológica se manifiesta mediante la interconexión física entre las cuencas hidrográficas relacionada con el medio físico y los procesos dinámicos del área. De manera funcional, la interacción de los sistemas ocurre mediante los flujos de agua de diferentes fuentes y con condiciones naturales variables, transportando consigo sedimentos y sustancias disueltas (Zamboni et al., 2009).

1.1.4 Evaluación de la conectividad hidrogeológica.

El agua que cae sobre la superficie de la tierra y se infiltra por la acción de la gravedad hasta las capas subterráneas de material geológico, se le denomina agua subterránea (IMTA, 2019).

El agua subterránea se identifica como un flujo no como un volumen, ya que se encuentra en constante movimiento desde la zona de recarga hasta el lugar donde descarga (Ponce, 2016). El agua subterránea fluye de manera permanente entre el material que las contiene y tras un recorrido específico, puede emerger a la superficie de manera natural a través de manantiales, humedales, cauces fluviales o de forma directa hacia el mar, así como también puede ascender de manera artificial mediante pozos, galerías u otros tipos de captaciones de agua (IMTA, 2019).

En hidrogeología, se determina como acuífero a cualquier estrato, formación o unidad geológica o conjunto de ellos que están conectados hidráulicamente, mantienen características litológicas específicas, influenciadas por parámetros como la permeabilidad, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, transmisividad y porosidad. Los acuíferos pueden contener y permitir la circulación de agua subterránea en cantidades significativas, las cuales pueden ser aprovechables mediante su extracción (Freeze y Cherry, 1979).

Los acuíferos están delimitados por una capa base de material impermeable. La circulación del agua a través de las capas que forman dependerá, de las características físicas del material geológico que las constituya. La profundidad de la capa de agua subterránea estará en función de elementos como la topografía, la geología, vegetación y el clima de la zona (Ponce, 2016). Los límites o bordes de los acuíferos, tanto verticales como horizontales están establecidos con fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo (Art. 3, párrafo II, de la Ley de Aguas Nacionales, 1992; Rabadán, 2019).

Los acuíferos no tienen la misma posibilidad de permitir la circulación del agua en cantidades significativas por lo que los acuíferos más comunes son aquellos que tienen valores de conductividad hidráulica y permeabilidad de media a alta (Freeze y Cherry, 1979; Custodio y Llamas, 1983).

El material geológico que forma los acuíferos más productivos son arenas y gravas no consolidadas, rocas sedimentarias permeables como areniscas y calizas y rocas volcánicas y cristalinas muy fracturadas, que permiten la circulación del agua subterránea. El origen del material geológico que las compone involucra factores posteriores como es la disolución de minerales que forman la roca, fracturamiento entre otros (Freeze y Cherry, 1979; Custodio y Llamas, 1983; Rabadán, 2019).

Los acuíferos se pueden clasificar respecto a sus condiciones de presión que emiten sus capas del embalse que los contiene, siendo los acuíferos libres, confinados y semiconfinados, los cuales son identificados. Los acuíferos que se clasifican por su textura o tipo de porosidad son los acuíferos kársticos (generados por los procesos de disolución de rocas carbonatadas comúnmente), acuíferos fisurados o fracturados son generados por la circulación del agua subterránea a través de facturas, fallas, fisuras o grietas de las rocas que los forman y los acuíferos porosos están constituidos por materiales granulares no consolidados que permiten la circulación o el almacenaje del agua en el espacio de sus poros (Freeze y Cherry, 1979; Custodio y Llamas, 1983; Rabadán, 2019).

Además de los acuíferos, las unidades geológicas definidas como acuitardos, contienen cantidades apreciables de agua subterránea, pero la transmite muy lentamente bajo ciertas condiciones permite una recarga vertical de otros acuíferos. Los acuicludos son formaciones geológicas saturadas de agua subterránea, pero son incapaz de transmitirla (Freeze y Cherry, 1979; Custodio y Llamas, 1983; Rabadán, 2019).

Los métodos de estudios hidrogeológicos tienen como objetivo caracterizar y medir el agua subterránea, así como sus implicaciones con otros elementos de los ecosistemas dentro del ciclo hidrológico, tomando como referencia el agua en tres aspectos: agua como un flujo, las sustancias disueltas que transporta como el transporte de masa y a los intercambios de agua y solutos con el medio como la relación roca-agua (Cabrera y Custodio, 2013).

Con el fin de conocer el funcionamiento de los sistemas acuíferos, se cuantifican los flujos, y los elementos que transporta el agua en ellos, además de evaluar las relaciones del agua subterránea con otras partes del ciclo hidrológico: aguas subterráneas, aguas oceánicas, otros acuíferos, biosfera, procesos geodinámicos internos y externos donde el agua subterránea tiene gran influencia. También, facilita la obtención de datos para evaluar y cuantificar los impactos de las actividades antropogénicas en una zona donde los acuíferos presenten vulnerabilidad, llevando esto a otros sistemas con los que están en conexión (Cabrera y Custodio, 2013).

El estudio del agua subterránea, con el análisis de los componentes de los ecosistemas, es importante para entender la relación del agua superficial y subterránea, en función del ciclo

hidrológico y sus interacciones en los diferentes ambientes que conforman los ecosistemas (Ponce, 2016).

Dentro del estudio del agua subterránea, la evaluación de las características físicas, químicas del agua, así como de las condiciones que adquiere el agua en el recorrido de sus flujos subterráneos influenciados por el material geológico, los rasgos geomorfológicos y las características del suelo y la vegetación, son herramientas importantes para la evaluación hidrogeológica (Carrillo-Rivera, 2000; Tóth, 2000; Cabrera y Custodio, 2013; Fagundo-Castillo et al., 2014).

Las actividades humanas también pueden cambiar las condiciones naturales del agua subterránea influyendo en la conectividad hidrológica, por lo que indicadores microbiológicos son importantes de analizar en la evaluación del agua subterránea.

1.1.5 Herramientas hidrogeológicas.

Las herramientas de hidrogeología física se consideran como indicadores indirectos, empleados para determinar el comportamiento dinámico de un fluido en un acuífero. Para esto, es necesario contar con elementos físicos que faciliten el acceso del agua subterránea, tales como pozos perforados, o dolinas inundadas (cenotes), entre otros accesos.

Las características geomorfológicas litológicas, vegetación, entre otros son indispensables para evaluar los flujos subterráneos de manera integral (Peñuela-Arévalo y Carrillo-Rivera, 2013).

Como herramienta de análisis del agua subterránea, la hidrodinámica estudia el comportamiento de los fluidos (líquido), en movimiento en condiciones específicas. Para el caso de la hidrogeología, los elementos que se emplean para determinar la dinámica del agua dentro del acuífero son profundidad y elevación del nivel estático, permitiendo complementar la evaluación de la dirección de los flujos.

Para un sistema con fluidos estáticos, la carga o potencial hidráulico (Figura 1.2) refleja la energía del agua en cada punto de un medio poroso saturado de la columna de agua, es decir, la energía total por unidad de masa es igual a la altura de la columna de agua, basado en un punto de referencia sobre un plano considerado, multiplicado por la gravedad (como la gravedad permanece constante en la zona del sistema estático), se considerará constante. La carga

hidráulica (Figura 1.2), representa al potencial hidráulico (Sánchez, 2017). Es un potencial de fuerza, porque su derivada espacial comprende unidades de fuerza por unidad de masa (Echeverri, 2012).

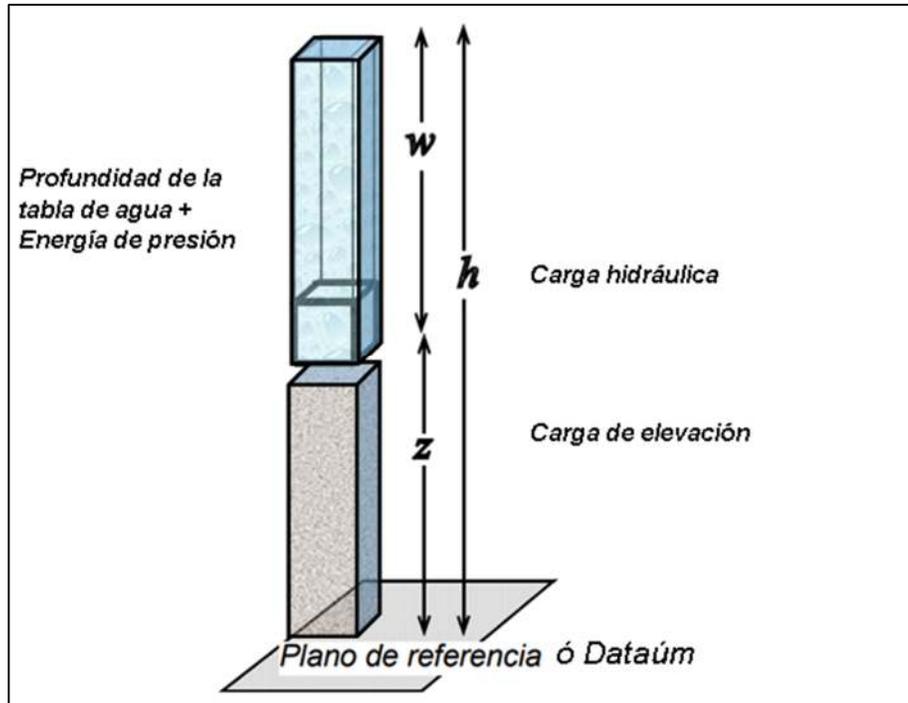


Figura 1.2. Diagrama de cargas hidráulicas, sistema en equilibrio o estático. Modificado de Sánchez, (2017).

Los niveles estáticos, son de gran utilidad para identificar las direcciones del flujo subterráneo ya que el fluido (agua) se desplaza de zonas con mayor carga o potencial hidráulico a zonas con menor, cuando las variaciones de carga (h) entre dos puntos del medio poroso que existen se produce el movimiento del fluido. Estos cambios se aprecian en la evaluación de dos piezómetros separados a una distancia específica (Sánchez, 2017).

Para conocer el comportamiento dinámico del fluido en un acuífero, se debe determinar la columna de agua de pozos o piezómetros presentes en el sistema subterráneo. Los cálculos obtenidos de la carga hidráulica permitirán determinar el nivel o superficie piezométrica, la cual representa la unión de todos los puntos con el mismo potencial hidráulico (Sánchez, 2017). Si estos niveles coinciden con el nivel freático del acuífero, indica que pertenece a una superficie

libre de un acuífero no confinado, si la superficie se encuentra sobre el nivel freático se tratará de un acuífero confinado (Echeverri, 2012).

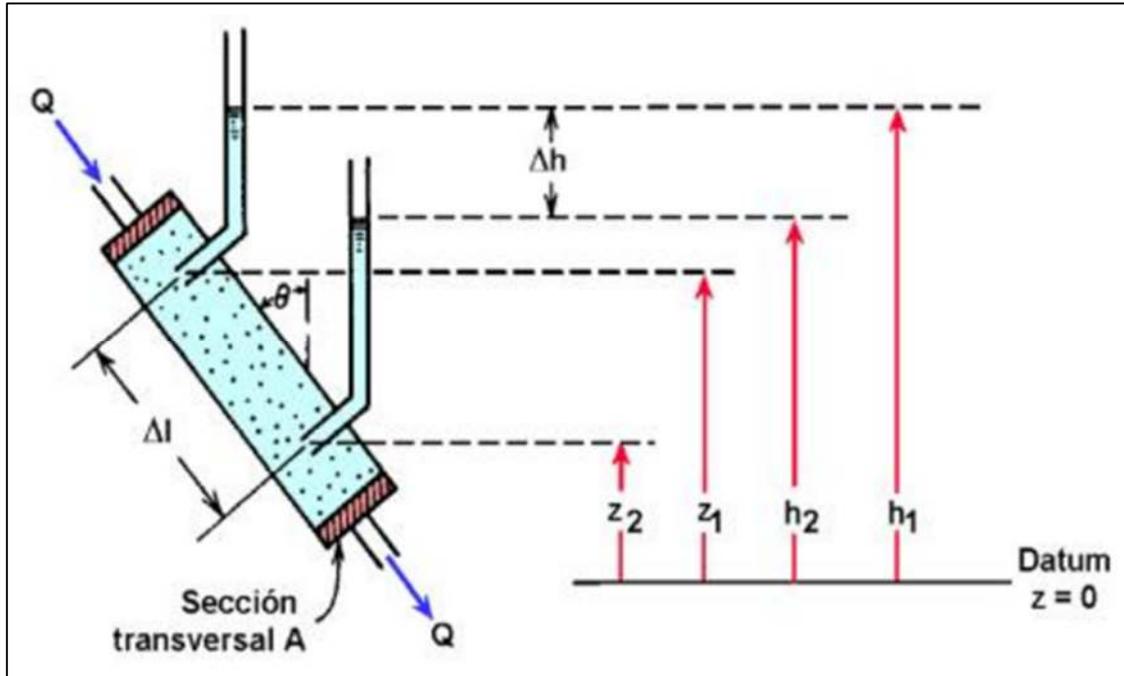


Figura 1.3. Experimento de Darcy, fuente Padilla Francisco, Geología Aplicada 1er curso, Ingeniería Geológica, Universidad de A Coruña, curso 2012-2013.

La ecuación de Bernoulli (Ecuación 1), explica el movimiento del fluido entre dos puntos A y B en condiciones constantes en el medio poroso, separados por una distancia Δl (Figura 1.3). La pérdida carga Δh será la diferencia entre los niveles piezométricos o carga hidráulica de cada punto o piezómetro (Custodio y Llamas, 1983). Para este caso, la fórmula que se empleo fue:

$$\frac{P_A}{\gamma_A} + Z_A + \frac{V_A^2}{2g} = \frac{P_B}{\gamma_B} + Z_B + \frac{V_B^2}{2g} + \Delta h \quad \text{(Ecuación 1)}$$

Donde:

P=presión ejercida por la columna de agua

γ = presión del fluido que con la gravedad representa el peso específico del fluido.

Z=la altura del punto respecto al plano de referencia

Como la velocidad en la mayoría de los casos es muy pequeña suele despreciarse, quedando de manera siguiente

$$h = \frac{P}{\gamma} + z \quad (2) \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Cuando existe un cambio o variación de la energía o potencial hidráulico entre dos puntos o piezómetros, el cálculo de la diferencia entre la longitud que separa esos dos mismos puntos, se denomina gradiente hidráulico. Un conjunto de puntos con características hidráulicas similares puede determinar la dirección del flujo del agua subterránea, ya que los fluidos se mueven desde los puntos de mayor potencial hidráulico hacia los puntos de menor potencial hidráulico (Freeze y Cherry, 1979; Custodio y Llamas, 1983; Rabadán, 2019). El gradiente hidraúlico podría ser útil para determinar o comprobar si el flujo viene desde continente hacia la costa.

1.1.6 Sistemas de flujo- Toth.

Un sistema de flujo se define como " un conjunto de líneas de flujo, en las que dos líneas de flujo adyacentes en un punto de la región de flujo permanecen adyacentes en toda la región, pudiendo ser intersecadas en cualquier lugar por una superficie no interrumpida a través de la cual el flujo se desarrolla en una sola dirección" (Tóth, 1936).

En una unidad hidrogeología los flujos subterráneos pueden reconocerse en tres régimen o tipos de sistemas de flujo (Figura 1.4).

- El flujo local, indica que las áreas de recarga y descarga mantienen una continuidad considerable (Tóth, 2009) y las profundidades que alcanzan sus flujos son someras (mayor interacción con los ecosistemas).
- Un flujo intermedio, se identifica por circular a profundidades mayores e incluye uno o más sistemas de flujos locales, se diferencia por presentar movimiento vertical descendente.
- El flujo regional, se moviliza en las partes más profundas de la unidad, pudiendo dividir a la unidad, por lo general, estos flujos inician en las zonas de recarga con mayor altitud y descarga en las zonas de menor altitud (Tóth, 2009; Rabadán, 2019).

La dinámica de los sistemas de flujo puede verse influenciados por cambios en la geometría de la unidad hidrogeológica, y por elementos como rasgos geológicos que se presentan durante su formación como es la estratificación de sus capas y fenómenos que posteriormente ocurran como son las fallas o fracturas entre otros, así como las escalas espaciales y temporales que tomen la circulación de los flujos dentro del unidad (Tóth, 2009).

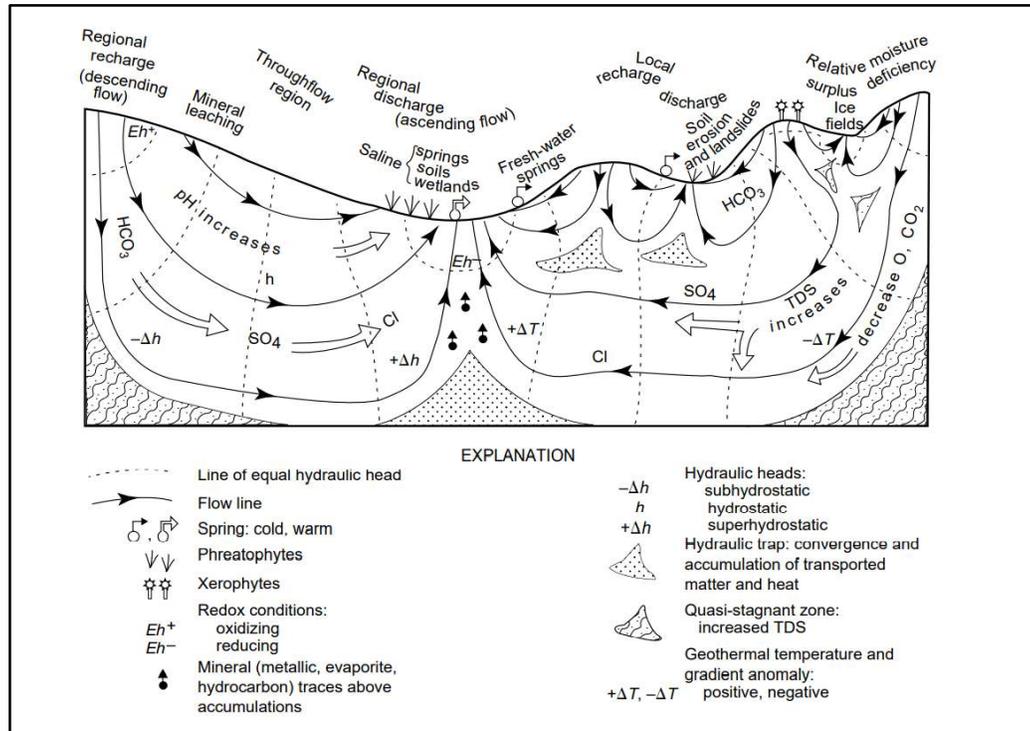


Figura 1.4. Esquema de los flujos modelo de Tóth, tomado de Rabadán, (2019).

Las características hidrodinámicas de los ecosistemas y el transporte de elementos mediante los flujos de agua producidos a escalas espaciales y temporales están relacionadas con la interacción del agua subterránea y del agua superficial (Tóth, 2009; Rabadán, 2019).

Según Rabadán, (2019), indica que los procesos naturales, productos y condiciones del agua subterránea generados a causa de las condiciones de equilibrio del agua como agente geológico son tres tipos:

- Procesos químicos - Disolución, hidratación, hidrolisis, reacciones de oxidación reducción, precipitación química, intercambio iónico, reducción de sulfatos, concentración, ultrafiltración y osmosis.
- Procesos físicos - Lubricación y modificación de la presión de los poros.
- Procesos cinéticos - Respecto a las características espaciales del sistema de flujo en relación con el factor gravitacional, este proceso determina el transporte de elementos y productos desde la porción superficial de materia acuosa, no acuosa y otras formas de la materia y organismos.

Por otra parte, las condiciones de los flujos de agua subterránea, también se pueden evaluar con ayuda de herramientas hidrogeoquímicas con el fin de compararse, fundamentar y/o determinar orígenes, movimiento y mezclas de agua de diferentes características, y junto con las técnicas de hidrogeología física, se pueden definir direcciones de flujos preferenciales y formas de descarga (Carreón-Freyre et al., 2005). La variación de la composición química del agua subterránea es pieza clave para entender y describir la dinámica e interacciones de los flujos subterráneos con el agua superficial y su relación con los ecosistemas (Tóth, 2009; Echeverri, 2012; Rabadán, 2019; Lagomasino, 2015).

La evaluación Hidrogeoquímica mediante el análisis de parámetros físicos-químicos del agua y la cuantificación de las concentraciones de elementos mayores pueden reflejar los procesos químicos que ocurren durante su movimiento (Tóth, 2009; Echeverri, 2012; Carmona, 2019), y mostrar señales de aportes de agua marina. A sí mismo, el efecto que produce la precipitación desde la zonas de recarga, durante su recorrido hasta su descarga, mientras que la determinación de cargas contaminantes como nutrientes y bacterias muestran las condiciones de los flujos desde la perspectiva calidad de agua, permitiendo identificar zonas contaminadas (Cejudo et al., 2022).

1.1.7 Características fisicoquímicas importantes en el agua subterránea.

Las condiciones geoquímicas del agua y la relación que mantiene con las rocas de la corteza terrestre por donde circula, así como los principales procesos que ocurren como resultado de la interacción con los ambientes naturales, se estudian a través de la Hidrogeoquímica (Custodio y Llamas, 1983).

Los estudios químicos del agua subterránea apoyan y aportan confirmaciones de las propiedades y las condiciones del agua subterránea y se pueden complementar con herramientas hidrogeológicas para robustecer los análisis del agua subterránea (Custodio y Llamas, 1983).

Temperatura.

En el agua subterránea, la temperatura no tiene mucha variación, pero puede estar en función de los cambios de temperaturas atmosféricas y normalmente puede presentar un incremento en relación con la profundidad. Rasgos geológicos, como fallas y fracturas al igual que zonas hidrotermales derivadas de actividad volcánica pueden cambiar la temperatura del agua subterránea (Custodio y Llamas, 1983).

La variación de la temperatura puede cambiar las condiciones del agua, desde su dinámica hasta las propiedades geoquímicas del agua. Hay procesos químicos que se presentan a ciertas temperaturas, por ejemplo, el pH influye en la solubilidad de gases y minerales (Custodio y Llamas, 1983; Rabadán, 2019). Otros procesos que dependen de la temperatura son el crecimiento de microorganismos como son las bacterias, que se desarrollan en condiciones óptimas con temperaturas altas, por ejemplo, las especies *Enterococcus faecalis*, *E. faecium*, *E. gallinarum* y *E. avium* de Enterococos pueden crecer en medios con temperaturas de hasta 45°C (Ríos-Tobón et al., 2017).

Potencial de hidrógeno – pH.

Como característica química del agua, el pH mide el número de iones de hidrógeno presentes. Se expresa como $\text{pH} = -\log \langle \text{H}^+ \rangle$, donde $\langle \rangle$ indica actividad de los iones de hidrógeno. Se visualiza mediante una recta con valores de 0 a 14. En las aguas naturales con una temperatura 25°C y un $\text{pH}=7$ se puede decir que hay neutralidad. Mientras que los valores de pH, adecuados para el desarrollo óptimo de organismos acuáticos son de 6.5 a 8.5, las aguas marinas normalmente tienen valores de 7.5 a 8 (Custodio y Llamas, 1983). Ciertos procesos químicos, como la disolución de los minerales de las rocas donde el agua está en contacto, la precipitación de minerales y la presencia y movilización de los elementos trazas, son controlados por las condiciones de pH del agua (Rabadán, 2019).

Conductividad eléctrica.

Se define como la capacidad del agua para conducir electricidad. Está en relación con el contenido de iones disueltos en el agua, que al igual depende de la temperatura, ya que a

temperaturas altas iones específicos presentan mayor disolución. La conductividad, se puede emplear para determinar la cantidad de iones en aguas de composición química similar en cuanto a la distribución de aniones y cationes (Custodio y Llamas, 1983).

Oxígeno disuelto.

Produce un medio oxidante que influye en grandes dimensiones en la solubilización o insolubilización de iones inestables respecto al cambio de su valencia, además que representa un factor importante en la actividad metabólica de los organismos. Si no está presente en el medio se dice que las condiciones son anaerobias. El oxígeno puede ser consumido fácilmente por sustancias oxidables como la materia orgánica, Fe^{+2} , NH_4^+ , NO_2^+ , así como por acción biológica siendo esta, la más común (Custodio y Llamas, 1983; Rabadán, 2019).

Alcalinidad.

El efecto que producen los carbonatos, bicarbonatos, hidróxidos, sulfatos, cloruros y aunque muy raramente boratos, silicatos y fosfatos en el agua, indica el cambio que tendrá el pH con la adición de cantidades específicas de ácido. Tal efecto es determinado por la alcalinidad; la cual se refiere a la capacidad del agua de neutralizar ácidos (Custodio y Llamas, 1983).

En el agua se enfoca la predominancia de las especies disueltas del sistema carbonato y sus proporciones por lo que, de forma teórica, se define como la suma de las concentraciones de carbonatos (CO_3^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-) así como también en menores proporciones hidróxidos (OH^-) dependiendo de las condiciones de pH (Drever, 1988; Appelo y Postma, 2005).

Aunque todas las especies iónicas del agua se relacionan con la alcalinidad, en las aguas naturales el sistema de carbonato es el que más importa y se ve más influenciado por las interacciones del agua con el aire ayudando a entender la alcalinidad del agua en función de las especies carbonatadas (Henry y Heinke, 1999). Respecto a las aguas subterráneas, el bicarbonato (HCO_3^-) es el elemento que predomina en función del pH con valores de 6.35 a 8.33 (Stumm y Morgan, 1996).

Elementos mayores.

En el agua subterránea, las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico y se definen como elementos mayores, elementos menores y elementos trazas. Dichos constituyentes, son el resultado de la interacción del agua con elementos presentes en la atmósfera gases como (CO_2 , N_2 , O_2 , etc.), de la interacción de minerales en el suelo y del material geológico por donde circula

el agua subterránea, así como de procesos biológicos y de condiciones introducidas por las actividades humanas (Echeverri, 2012).

De igual manera, en el proceso de la infiltración en el suelo y mezcla de aguas en diferentes escalas se puede adquirir o perder elementos presentes en el agua subterránea. Las actividades antropogénicas, pueden tener gran influencia en las concentraciones de los componentes inorgánicos del agua subterránea volviendo algunos elementos contaminantes por el incremento de su magnitud sobre los valores permitidos (Freeze y Cherry, 1979). Los iones disueltos en el agua subterránea, se denominan elementos mayores compuestos por los aniones cloruro (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-); y por los cationes sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}).

Para delimitar y conocer la distribución del agua subterránea, origen, principales procesos químicos que ocurren durante su recorrido, interacciones agua-roca, mezclas e interconexiones de diferentes tipos de agua (superficiales y subterráneas), intrusión salina, y su posible conexión hidráulica con el mar desde el continente, es necesario conocer el orden de abundancia y sus variaciones espaciales y temporales de los elementos mayores en el agua (Pernía-Llera, 1993; Sánchez-Sánchez, 2015; Carmona, 2019).

1.1.8 Elementos que modifican la calidad natural del agua.

La calidad del agua se refiere al estado idóneo del agua para un uso determinado, la cuantificación de ésta se basa en variables de calidad definidas por las propiedades físicas, químicas y biológicas medidas en el agua (Boyd, 2015). La calidad natural del agua depende de factores climáticos, hidrológicos, geológicos y ecológicos. Las actividades humanas pueden afectar la calidad natural del agua por las malas prácticas en el sector agrícola, industrial y la inadecuada disposición de las aguas residuales (Boyd, 2015).

La contaminación del agua subterránea se refiere a la degradación de las condiciones naturales del agua subterránea, donde los factores contaminantes pueden afectar los ecosistemas o bien la salud humana, un ejemplo que sobresale es: la disposición inadecuada de las aguas residuales mediante fosas sépticas y la contaminación por la infiltración de sustancias contaminantes por producto de la irrigación (Todd y Mays, 2005).

Nutrientes.

De los nutrientes naturales que se encuentran en los sistemas acuáticos, el nitrógeno como elemento más abundante en la atmósfera, también es el nutriente más común en las aguas naturales. En el agua, el nitrógeno puede tener dos orígenes: nitrógeno orgánico, a causa de la contaminación producto de las aguas residuales y en menor proporción por la descomposición de materia orgánica como animales y plantas, mientras que el nitrógeno inorgánico, se debe al enriquecimiento de nitratos en el agua, producto de los fertilizantes utilizados en las actividades agrícolas (Cabello y Hervás, 2001; Pacheco-Ávila et al., 2002; Boyd, 2015).

En las aguas subterráneas, la especie nitrógeno comúnmente más identificada es el nitrato (NO_3^-), el cual en función del tiempo bajo condiciones específicas llega a esa fase y se manifiesta en su forma más estable, permitiendo mayor movilidad en las aguas subterráneas (Custodio y Llamas, 1983; Pacheco-Ávila et al., 2002). El nitrógeno en el agua también se puede encontrar como amonio (NH_4^+), amoníaco (NH_3), nitrito (NO_2^-), nitrógeno molecular (N_2), óxido nitroso (N_2O) y nitrógeno orgánico, este último, se encuentra incorporado a las sustancias orgánicas (Freeze y Cherry, 1979).

Las formas del nitrógeno presentes como amonio ionizado (NH_4^+) y amoníaco (NH_3) sumados, determinan el amonio total en aguas naturales. La transformación de amoníaco volátil a ion amonio es más lenta con valores de pH y temperaturas más bajos en el agua, ya que está sometida fundamentalmente a la acción del pH y la temperatura (Paredes et al., 2007; Anthonisen et al., 1976).

En aguas naturales, con condiciones normales de 25°C de temperatura y un pH de 7, el amoníaco o amonio no ionizado representa el 0.6% del amonio total presente, y a temperatura de 30°C y valores de pH de 9.5 el porcentaje del amoníaco o amonio no ionizado puede aumentar hasta un 72% (Paredes et al., 2007). En condiciones aeróbicas, el ion amonio es oxidado por acciones químicas y bacterianas (Paredes et al., 2007). Después del proceso de amonificación, por efecto de oxidación el amonio se convierte a nitritos (NO_2^-) y luego a nitratos (NO_3^-) (Pacheco-Ávila et al., 2002).

El movimiento del nitrógeno en todas sus fases puede ser a través del medio poroso en forma de gases o en forma de solutos en el agua. La distancia, dirección, cantidad y condiciones del nitrógeno en cualquiera de sus compuestos va a estar en función del tiempo, y de las propiedades

químicas y físicas del medio en donde se desplace, además de las condiciones químicas del agua, para este caso (Pacheco-Ávila et al., 2002).

La conectividad continental con los ambientes marinos, a través de las descargas submarinas de agua subterránea (SGD), es una fuente importante de contribución de nutrientes a los océanos y se cree que en grandes concentraciones afecta notablemente a los arrecifes de coral y pastos marinos, ya que al ser ecosistemas oligotróficos las consecuencias que provocan la eutrofización del agua son alarmantes (Pérez-Gómez et al., 2020).

Bacterias.

Además de los elementos inorgánicos que puedan indicar las condiciones del agua subterránea, los indicadores biológicos como los parámetros bacteriológicos, permiten evaluar el agua subterránea desde la perspectiva de calidad del agua para consumo humano (Ríos et al., 2017). Los indicadores bacteriológicos, pueden relacionarse con otros parámetros para indicar fuentes de contaminación puntual y conexión hidráulica del agua continental hacia los ecosistemas costeros (Sánchez y Pinto, 2015)

1.2 Marco Hidro-geo ecológico.

En este apartado, se detalla los elementos físicos de la PY, como son sus cuencas, las características geológicas, y los rasgos hidrológicos que definen sus flujos subterráneos. Además de una descripción de los ecosistemas costeros relacionados a la conectividad hidrogeológica

1.2.1 Cuenca de la península de Yucatán (PY).

El agua como recurso natural se delimita, gestiona y caracteriza mediante cuencas hidrológicas, las cuales son unidades naturales de acumulación de agua. Se componen de sistemas y subsistemas definidos en base a su funcionamiento o aprovechamiento, la dinámica del flujo y descarga del agua (Ordoñez-Gálvez, 2011).

Las cuencas obedecen a tres dimensiones, las cuales son la profundidad, altura y tiempo, están en función de las características hidrológicas, geológicas y ecológicas de los embalses que las contienen.

El ciclo hidrológico, como proceso fundamental en la cuantificación de la oferta del recurso hídrico en una cuenca, puede ser analizado mediante balances hídricos, influyendo en su gestión y en la evaluación de los elementos que constituyen la unidad hidrológica. Los elementos que conforman los ecosistemas naturales que interactúan con las cuencas, influyen en la calidad natural del agua, por lo que integrarlos en la gestión del agua es fundamental (Black, 1997).

Los estados que conforman la PY son: Quintana Roo, Campeche, Yucatán y una porción de Chiapas. El Golfo de México y el mar Caribe son los grandes cuerpos de agua salada que la rodean.

La PY se clasifica como la Región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán (RHA XII PY), denominada así por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2015), como medida para gestionar el recurso hídrico y asegurar la sustentabilidad hídrica a largo plazo.

La RHA XII PY está constituida en cuatro regiones hidrológicas, numeradas 30, 31, 32 y 33 (Figura 1.5 a). La CONAGUA divide a la cuenca hidrológica península de Yucatán, en cuatro subcuencas hidrológicas principales.

- La región 32 (Yucatán Norte), está ubicada al centro de la península en el estado de Yucatán y la porción norte de Quintana Roo se clasifica como cuenca criptorreica.
- La Región 33 (Yucatán Este), está ubicada en el sur del estado de Quintana Roo y comparte condiciones geológicas e hidrogeológicas con Belice, donde un punto de interacción importante es el río Hondo.
- La Región 31 (Yucatán Oeste) del río Champotón, está ubicada y extendida en el suroeste-noreste del estado de Campeche. Finalmente, la cuenca del río Candelaria, se encuentra más al sur de la PY e incluye parte de la región 30 (Grijalva-Usumacinta) perteneciente al estado de Campeche (Aguilar y Kauffer, 2011).

Para fines de administración de las aguas subterráneas nacionales, la PY está dividida en cuatro unidades hidrogeológicas denominados acuíferos (Figura 1.5b). Estos acuíferos se identifican como “Península de Yucatán” el cual abarca los estados de Yucatán, Campeche y Quintana Roo, Cerros y Valles en la porción central del estado de Quintana Roo, Cozumel en la Isla de Cozumel

y Xpujil en el centro de la PY incluyéndose en una porción de los estados de Campeche y Quintana Roo.

Mapa de Regiones Hidrológicas

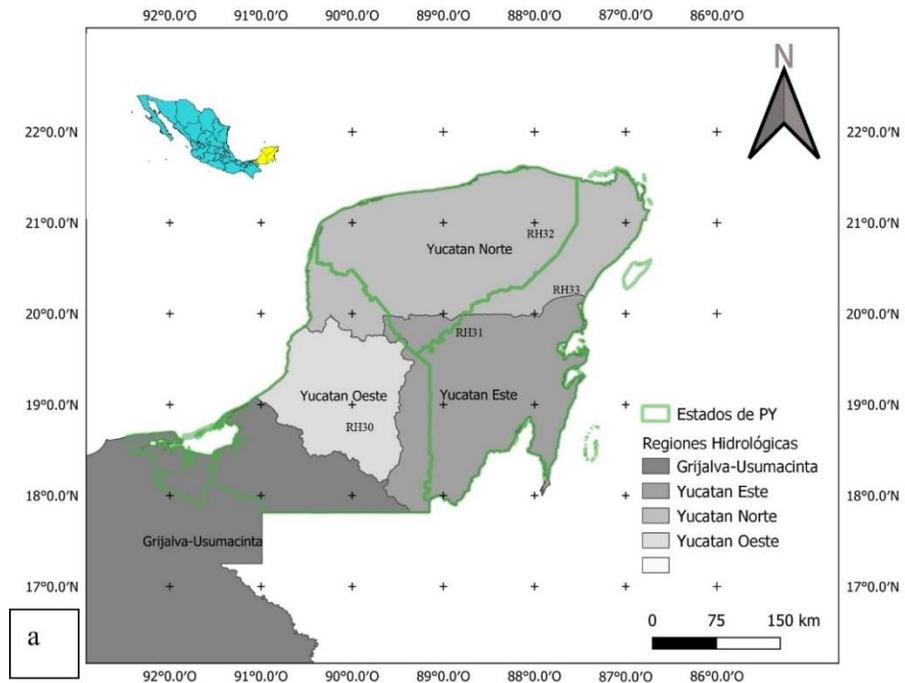


Figura 1.5. a) Mapa Región Hidrológico-Administrativa XII PY. Mapa elaborado con datos de CONAGUA y CONABIO (2022) y b) Mapa de los acuíferos de la península de Yucatán. Tomado de CONAGUA, (2020).

1.2.2 Condiciones geológicas de la península de Yucatán (PY).

La PY se encuentra en la microplaca continental denominada Bloque de Yucatán, con un área de 450,000 km², situada al sur de México, colindando con la parte norte de Belice y Guatemala (Rosenfeld, 2002). Está integrada por una plataforma estratificada compuesta de rocas carbonatadas, de edades del Paleoceno-Plioceno en el terciario hasta el Holoceno en el Cuaternario. La formación sedimentaria se yuxtapone en un basamento con edad del Paleozoico, y sobre éste, se encuentran rocas emplazadas del Mesozoico-Cenozoico de 3,500 m de espesor (Bautista y Palacio, 2012).

Las unidades hidrogeológicas caracterizadas principalmente por la composición de las rocas, la porosidad y permeabilidad son identificadas con rocas del Cretácico medio-inferior terciario, compuesta por rocas sedimentarias marinas, predominantemente calcáreas (calizas-arenitas) con permeabilidad localizada, unidad que cubre prácticamente toda el área de la PY. También se encuentra la unidad con rocas del Pleistoceno reciente, compuestas de terrazas marinas, gravas, arenas y limos, con depósitos aluviales y lacustres con permeabilidad generalizada media-alta (CONABIO, 2002).

1.2.3 Condiciones hidrogeológicas de la península de Yucatán (PY).

En la PY se reconoce, un relieve positivo poco pronunciado en la porción septentrional y desde planicies costeras con elevaciones menores de 50 m hasta un relieve más prominente tipo karst de mesa, con elevaciones desde 20 a hasta 400 msnm. Este relieve compone la Zona De la porción meridional hacia el sur de la PY (Lugo et al., 1992). Por las condiciones geológicas del terreno, las precipitaciones tienden a infiltrarse rápidamente al subsuelo evitando que exista escurrimientos superficiales importantes (Gonnea et al., 2014).

El espesor del lente de agua subterránea es relativamente delgado alcanzando como máximo 100 m de ancho. Se asume que el lente de agua subterránea por sus características fisicoquímicas se encuentra por encima del agua de marina, el espesor de lente es más delgado

en las costas incrementándose hacia tierra adentro (Marín-Stillman et al., 2004; Bautista y Palacio, 2012).

La influencia del mar para la Zona Continental es importante, debido a que hay una intrusión salina en gran parte de las costas de la PY hacia el acuífero, dado a que el material geológico del acuífero presenta una gran permeabilidad ocasionando una alta conductividad hidráulica. Sumado a lo anterior, las elevaciones del nivel freático son bajas y disminuyen aún más conforme se acercan a las costas (Bauer-Gottwein et al., 2011).

En la península de Yucatán, se reconocen rasgos geológicos, identificadas como el Anillo de Cenotes, Sierrita de Ticul, Zona De Fracturas de Holbox, el Bloque de falla Río Hondo; las cuales influyen en la dinámica de los flujos subterráneos en la PY (Perry et al., 2002).

Además, se localizan grandes conductos producto de la disolución de la roca que se extienden entre 1 y 10 km de longitud, incluyendo uno de los sistemas de cuevas y cenotes más grandes del mundo, al igual que un conjunto de pequeñas fracturas a pequeña escala y cavidades u oquedades, influyen en el movimiento del agua hacia las costas (Bauer-Gottwein et al., 2011).

Las características de las rocas que forman la PY, los rasgos geológicos post formación y los procesos ambientales han definido regiones hidrogeológicas (Figura 1.6) (CONAGUA, 2015), las cuales se identifican cómo:

- Región costera, correspondientes a las playas de barrera, lagunas de inundación y bahías someras, también se asocian con sistemas de fallas y fracturas, en esta zona el relieve es nulo y lente de agua es delgado, la permeabilidad de las rocas (calizas), en su mayoría es alta.
- Círculo, semicírculo o anillo de cenotes, zona de alta permeabilidad donde se identifica un parteaguas en la base (Telchaquillo), direccionando los flujos a sus extremos con dirección NW y NE. El espesor del manto es de 40 m a una profundidad de 10 m.
- Planicie interior, compuesta por roca caliza permeable y forma un lente de agua de menos de 70 m de espesor sobre el agua marina.
- Región de cerros y valles, compuesta de rocas carbonatadas con alta permeabilidad, de delimita el acuífero de mayor espesor donde se detectan niveles estáticos de entre 50 a 100 m.

- Cuencas escalonadas, Zona Asociada a fracturas, compuesta de rocas calizas con margas, yeso, anhidrita que contribuye a que las rocas tengan baja permeabilidad.
- Xpujil, Zona De mayor altitud, las rocas presentan fractura miento y alto grado de carstificación. Se definen flujos con direcciones hacia las costas desde esa zona.

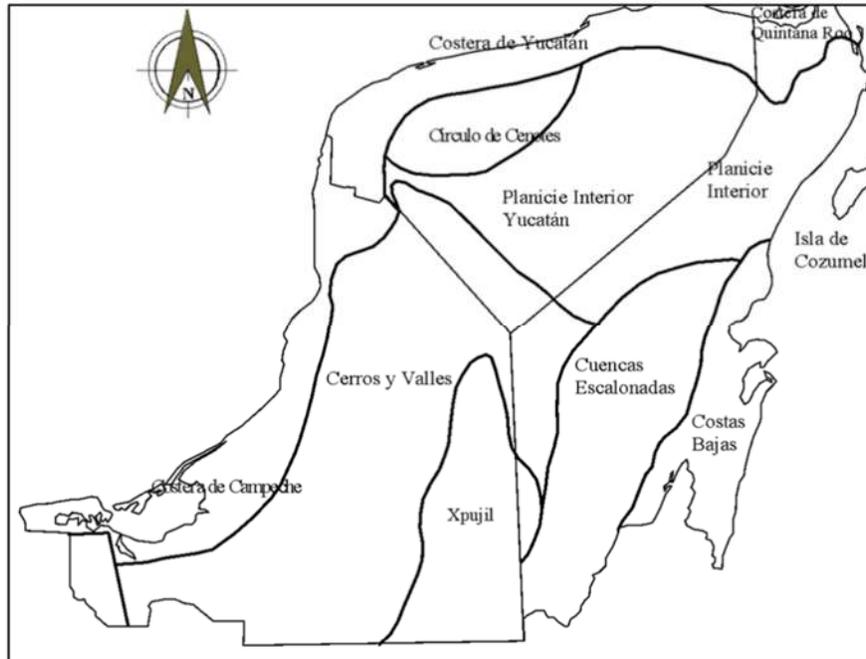


Figura 1.6. Mapas de regiones hidrogeológicas, tomada de CONAGUA (2020).

El gradiente hidráulico para la región norte es de 7-10 mm/km, el cual es relativamente pequeño (Marín, 1990; Perry et al., 2002), pero por los rasgos geológicos de la PY la velocidad de los flujos puede ser de metros por día (Beddows, 2004).

El flujo preferencial a escala regional en la PY es de manera radial (Figura 1.7) y puede tomar como direcciones de SO-NE en zonas que presentan mayor altitud y O-E en las demás zonas que llegan hasta la costa (Marín et al., 2004; Perry et al., 2002; JICA, 2004; Gondwe, et al., 2010; Bauer-Gottwein et al., 2011; Sánchez-Sánchez, 2015; CONAGUA, 2015).

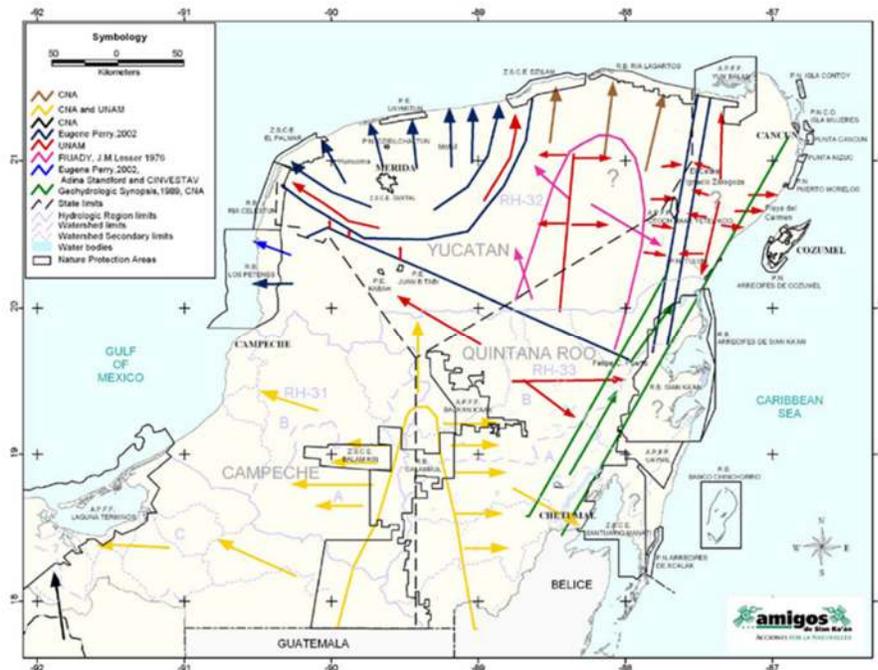


Figura 1.7. Mapa de trayectorias de flujos subterráneos a escala regional de la península de Yucatán. Tomado de Bauer et al., (2011).

1.2.4 Condiciones hidrogeoquímicas del comportamiento de flujos en la península de Yucatán (PY).

Las rocas que forman al acuífero de la PY se componen de una gran cantidad de carbonatos de calcio, lo cual ha desarrollado condiciones kársticas que, en combinación con la interacción de agua subterránea o agua de mar, han dado como resultado que los procesos que controlen la composición química del agua subterránea en la PY sean principalmente la disolución de carbonatos, así como la mezcla de agua subterránea y agua marina (Hanshaw y Back, 1980; Perry et al., 2002). Además, se presentan estratos compuestos de minerales como aragonito, celestita y de rocas evaporitas como el yeso y la anhidrita al disolverse pueden cambiar la química del agua y delimitar zonas (Gonnea et al., 2014).

Los iones que proporciona la disolución de evaporitas particularmente el Sr y el SO_4 junto con las proporciones de Cl y SO_4/Cl , permiten distinguir las zonas del sureste y el noreste determinado por los iones dominantes en el agua (Perry et al., 2002).

1.2.5 Acuífero kárstico costero.

La PY contiene uno de los sistemas de acuíferos kársticos más extensos del planeta, dicho acuífero se extiende sobre un área de 165,000 km² a través de los países de México, Guatemala y Belice, lo cual lo define como un acuífero transfronterizo (Bauer-Gottwein et al., 2011). El flujo a través del material kárstico poroso es característico de un acuífero altamente permeable, de tal manera, que todas las partes el sistema hidrogeológico de la PY presentan buena comunicación hidrodinámica (Beddows, 2004; Velázquez-Oliman, 1995; Marín, 1990; Perry et al., 1989).

Se define como acuífero costero kárstico costero con grado de libertad ya que lo identifica como acuífero no confinado o freático, donde la zona no saturada se encuentra yuxtapuesta en el acuífero superficial (Moore, 2010; Hernández-Terrones et al., 2011). El destino del agua subterránea que se moviliza en el acuífero (Figura 1.8) llega a las costas a través de flujos específicos mediante conductos y por fuentes difusas a través de los poros (filtración) (Herrera-Silveira et al., 2013; Null et al., 2014). Al ser un acuífero que comparte flujos de agua subterránea entre la tierra y el mar en sentidos bidireccionales con distintos grados de mezcla, muchos autores lo definen como un estuario subterráneo costero (Moore, 2010) donde se presentan un sinfín de procesos biogeoquímicos de gran interés ecológico.

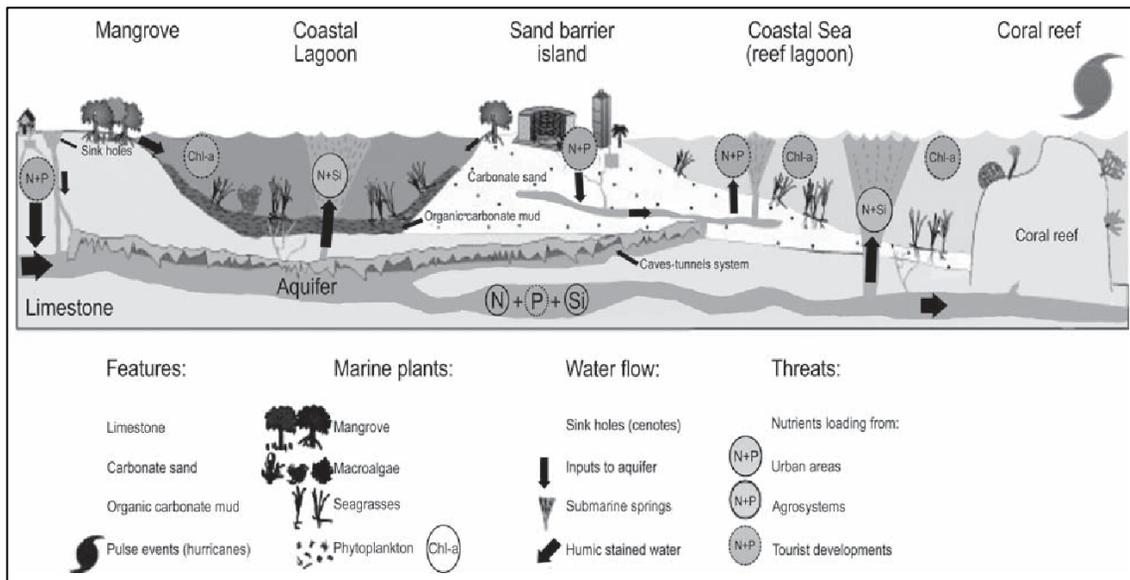


Figura 1.8. Acuífero kárstico costero, tomado de Herrera-Silveira et al., (2013).

1.2.6 Flujo de poros o “Seepage”.

Los flujos de agua subterránea que viajan a través de acuíferos costeros mantienen condiciones variables, ya que se rigen por diferentes procesos hidrodinámicos definidos por el ambiente físico y los cambios temporales de la zona costera (Zamboni et al., 2009). La dirección de los flujos que impulsa el agua subterránea hacia la costa se deriva de las diferencias de energías desde las zonas más altas en el continente hacia las zonas más bajas tomando como referencia el nivel del mar (Zamora et al., 2017).

El flujo del agua subterránea encuentra un límite en la costa, que puede estar definido por la influencia del mar a través de los sedimentos denominado intrusión salina. Esta diferencia puede ser dada por la densidad de cada tipo de agua ya que el agua subterránea tiene menor densidad que el agua de mar (Zamora et al., 2017). Los flujos de agua subterránea pueden descargar al mar en forma de circulación de la mezcla del agua subterránea y agua de mar, mientras que los flujos de agua dulce que se infiltran en el material permeable del frente de playa por efecto del proceso de seepage son directos y continuos (Figura 1.9 a).

El efecto que produce la descarga de agua subterránea en la zona intersticial de la costa, a través de los poros del material permeable del frente playa, es muy importante ya que son producto de trayectorias preferenciales de un flujo continuo que ocurre a través de toda la costa, así como en cualquier parte de la laguna arrecifal hacia el exterior (Figura 1.9 b) (Zamora et al., 2017).

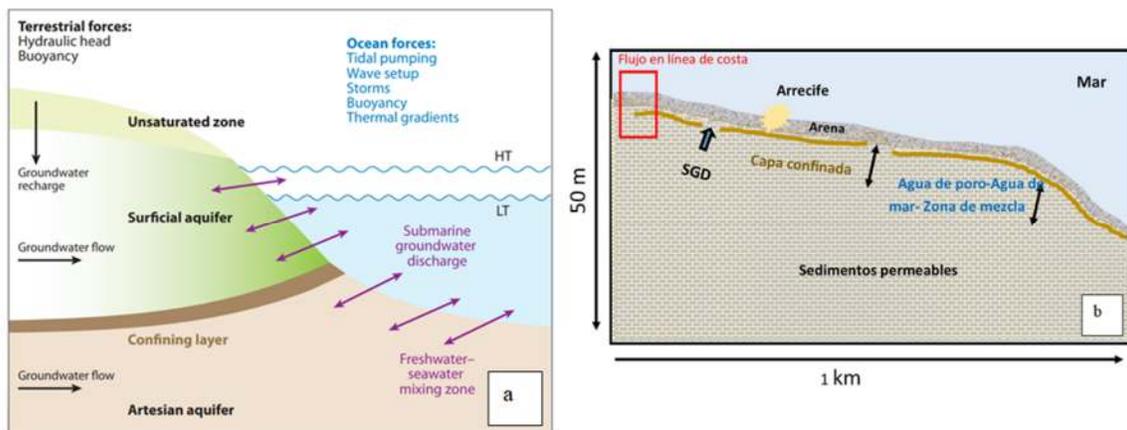


Figura 1.9. a) Modelo conceptual del Flujo de poros o seepage en la costa, Tomado de More, (2010) y b) flujo de poro escala amplia (elaboración propia).

1.3 Estudios previos de conectividad hidrogeológica.

De los estudios relacionados con la conectividad de ecosistemas, en su mayoría están enfocados a la evaluación ecológica y sus procesos asociados al medio físico del paisaje, resaltando la conexión desde los ecosistemas terrestres hasta los marinos. Sin embargo, en este estudio nos concentramos en la conectividad hidrogeológica, como resultado de la interconexión de los elementos físicos del medio que permite el flujo de agua subterránea a través de los ecosistemas incluidos en la parte continental con la zona costera y a su vez los ecosistemas marinos.

Algunos de estos estudios cuantifican los flujos que llegan a las costas y analizan las proporciones de concentraciones de nutrientes, al igual el uso de trazadores (isotopos estables y elementos conservativos) que identifican el origen de las contribuciones de agua subterránea al mar desde el continente. Requieren variables específicas como método para explicar la presencia de los flujos y su proporción recibida en zonas específicas. A continuación, se presentan algunos de los estudios previos revisados a nivel mundial, regional y local.

1.3.1 Ejemplos de estudios a nivel mundial.

Moore, (2010), hizo un análisis de información recabada en estudios mundiales, de las contribuciones de agua subterránea al mar. Conceptualiza las descargas y explica los métodos que se implementaron para determinar la presencia de los flujos al mar desde un enfoque multidisciplinario. En el estudio se puntualizan los arrecifes como ecosistemas receptores siendo importante ya que los flujos directos de aguas subterráneas al océano llevan consigo una gran cantidad de agua subterránea ricas en nutrientes y otros elementos que se relacionan con los cambios fisicoquímicos del agua del mar y modifican la funcionalidad de los ambientes marinos.

Por otra parte, Vicente-Vicente, (2011), en un estudio realizado en el Golfo de Valencia (Este de España) en la columna de agua cerca de la zona de surf a lo largo del margen litoral y en pozos excavados en la playa determinó indicios que sugieren entradas de descargas submarinas de agua subterránea (SGD) al mar, mediante el análisis de parámetros fisicoquímicos como temperatura, salinidad, nutrientes (amonio, nitrito, nitrato, silicio y fósforo) y clorofila. Como resultados, detectaron indicios de agua subterránea en los perfiles que definieron, sin embargo, fueron variables los valores en la distribución espacial.

Un estudio realizado por Zamora et al., (2017) en las costas de Bolinao (Filipinas), se analiza la importancia de la interacción de agua de mar con el agua subterránea, donde la química del agua de poro y las descargas al mar que se dan a través del sedimento permeable de la zona supra mareal, intermareal y submareal son los puntos clave para entender la conectividad hidrogeológica al mar.

En dicho estudio Zamora et al., (2017) realizaron mediciones del flujo puntual *in situ* utilizando medidores de filtración (fenómeno de seepage) y de salinidad para guiar simulaciones numéricas de flujo y transporte de agua subterránea con el fin de comprender la dinámica de mezcla con el agua de mar. En los resultados identifican una contribución de agua dulce a través del sedimento permeable con diferentes características y detectan que un flujo de agua subterránea terrestre con presiones mayores a la que se combina en la mezcla llega a las zonas donde se realizó el estudio, además identificaron que los flujos de filtración se presentan más allá del frente de playa hasta la zona submareal y que el fenómeno de mareas influye en los flujos y la salinidad medida.

Por su parte, Tait et al., (2014), recurre a la datación con los isotopos de tritio de las aguas subterráneas y un balance de masas de radón para evaluar la contribución de las SGD a un balance de nutrientes a la laguna arrecifal de una zona tropical en Rarotonga (Islas Cook). Determinaron que el intercambio en mar abierto presentó la mayor exportación de la laguna de nitrógeno (N) = 61 % y fósforo (P) = 22 %, con la exportación de N principalmente en forma de nitrógeno orgánico disuelto (DON; 93 % del N total). Además de que a pequeña escala (~50 m) indicó áreas con mayores aportaciones de NH_4^+ hacia el medio de la laguna arrecifal, indicando la entrada de SGD lejos de la zona del frente de playa donde se mantiene una fuente de filtración de agua de poro (Flujo de poros o seepage).

Luijendijk et al., (2020), desarrollaron un modelo que indica la división de las descargas en las costas como una parte de agua subterránea y otra mediante las descargas superficiales cercanas a las costas dándose en la misma proporción. Establecen que la contribución mundial de SGD es ~ 0.6% (0.004% -1.3%) de la entrada total de agua dulce a los océanos, así también que las aguas subterráneas globales se definen por el comportamiento del flujo en la porción subterránea de la cuenca y no por el volumen de aguas almacenada, al igual que el flujo global se determina por la influencia de cuencas hidrográficas costeras repartidas a nivel mundial.

1.3.2 Ejemplo de estudios en la península de Yucatán (PY).

Mediante una evaluación de calidad de agua, fitoplancton y pastos marinos en lagunas costeras Herrera-Silveria, (2006) analizó las condiciones de descarga de agua subterráneas de las lagunas costeras de la PY para establecer la salud del ecosistema. En esta investigación la salinidad fue indicador del nivel de conectividad entre los ecosistemas, ya que permitió identificar la variabilidad de las descargas de agua dulce y marina entre los ecosistemas. La magnitud de las descargas de las SGD, así como la intensidad de las corrientes y amplitud de las mareas, se identificaron como controles de la conectividad tierra-mar y mar-tierra, además se pudieron relacionar con las fuentes de contaminación con nitratos.

1.3.3 Ejemplos de estudios en la zona norte de Quintana Roo.

Hernández-Terrones et al., (2011) realizaron una serie de muestreos desde pozos en la porción continental hasta el mar abierto en la zona de Puerto Morelos, en una sección que abarca sistemas costeros en un gradiente de la porción continental-ambientes marinos antes y después del arrecife coralino, utilizando silicatos y la salinidad como trazadores de agua subterránea y de mar. En dicho estudio, se estimó un flujo de nitrógeno hacia el arrecife del Parque Nacional de Arrecifes de Puerto Morelos en el agua subterránea de 2.4 Toneladas de N km⁻¹ año⁻¹ y de P=75 a 217 kg km⁻¹ año⁻¹. Como conclusión resaltan que se requiere estudios hidrológicos de agua subterránea más integrados para gestionar el recurso hídrico y evaluar vulnerabilidad entre los ecosistemas kársticos de la zona.

Null et al., (2014), realizaron una investigación utilizando combinaciones de balances de masa, trazadores y soluciones analíticas para identificar las descargas de agua subterránea en el ambiente costero, abarcando los sitios de Cancún, Puerto Morelos, Sian Ka'an y Xcalack), estos sitios están ubicados en diferentes regiones geomorfológicas y con diferentes usos del suelo.

Las descargas que se asumen en el estudio de Null et al., 2014 provienen de un acuífero más profundo, los cuales están influenciados por la geología, carga hidráulica, la cantidad de precipitación pluvial ocurrida en sus diferentes zonas de recarga, así como de las características de la zona de mezcla donde ocurre la intrusión salina del agua del mar al continente y también por las descargas de agua en el frente de la playa compuestas de la recirculación de agua salina y agua subterránea Los resultados obtenidos fueron que el promedio de SGD a lo largo de las costas del Caribe es de 308 m³ día⁻¹ m⁻¹ y varía en las regiones sur y norte.

Por su parte Navarro-Espinoza (2015), presenta un estudio para relacionar el desarrollo costero con la fuente de nutrientes a los arrecifes y su posible causa de la prevalencia de enfermedades en las especies *Acropora palmata* en el Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos. Los resultados encontrados fueron una prevalencia de enfermedades de 9.61% donde la enfermedad de la viruela blanca es la más abundante con 5.86% en las colonias enfermas, la enfermedad denominada banda blanca registro un 3.82% en las colonias. En esta investigación se evaluó el efecto de la SGD (ojos de agua), escurrimientos y descargas de agua provenientes del manglar y el canal de la laguna Nichupté, mostraron tener un efecto sobre las enfermedades de coral.

González-Herrera et al., (2018) realizaron a su vez una campaña de muestreo para evaluar la calidad del agua empleando en análisis de iones mayoritarios, metales pesados y coliformes en Pozos de la zona de Puerto Morelos, así como la inferencia del flujo preferencial mediante el cálculo de los potenciales hidráulicos. En los resultados se detectan que las familias de agua predominantes son Bicarbonatadas-cálcicas, evolucionando hacia aguas con condiciones marinas, además se nota una contaminación antropogénica por metales pesados como hierro, cadmio, cobre y arsénico al igual que coliformes totales.

Por su parte Cejudo et al., (2022), describen una descarga de agua subterránea (DAS), de manera integral, mediante la cuantificación de concentraciones de elementos mayores, silicatos, metales e isótopos estables como ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$), se cuantificó la descarga volumétrica calculando el caudal de descarga además se emplearon herramientas de geofísica como la resistividad eléctrica con el fin de identificar zonas saturadas. Entre los resultados que se obtienen en dicho estudio, la descripción de una sola descarga subterránea con un caudal de descarga estimada de entre 1 y 900 m³ día⁻¹ mantiene variabilidad en sus características hidrogeoquímicas a una escala temporal y espacial.

Las comparaciones de las aportaciones de las precipitaciones y las variables hidrogeoquímicas no presentan relación directa sin embargo los detalles geológicos obtenidos con las tomografías de resistividad identifican una matriz saturada de agua dulce de aproximadamente 7 metros por debajo de la superficie entre conductos de disolución y pequeños canales de contribución de agua subterránea.

JUSTIFICACIÓN

El agua subterránea y el agua superficial mantienen una fuerte interacción con los ecosistemas por donde circula, en el caso de los ecosistemas costeros de la península de Yucatán, están influenciados por las características geológicas, hidrológica, geoquímicas y biológicas que los componen.

La evaluación de las propiedades fisicoquímicas e hidrogeoquímicas del agua en los diferentes cuerpos de agua, incluidos en los ecosistemas costeros y analizar los aportes de agua que llegan hasta el ecosistema receptor (arrecifes) en múltiples escalas, así como las condiciones que traslada mediante herramientas hidrogeológicas para comprobar la dirección de los flujos locales, son la clave que permitirá demostrar la conectividad hidrogeología entre los ecosistemas.

HIPÓTESIS

Una evaluación integral, apoyada de herramientas de hidrogeología física (topografía y nivel freático) y el análisis de las características fisicoquímicas, hidrogeoquímicas, así como las condiciones bacteriológicas del agua subterránea en un transecto terrestre-marino generará la evidencia de interconexión hidrogeológica entre la cuenca superficial-subterránea de la Zona Costera y los arrecifes en el norte del estado de Quintana Roo.

OBJETIVO GENERAL

Obtener evidencias de la conectividad hidrogeológica entre la cuenca superficial-subterránea y los ecosistemas costeros, mediante una evaluación con hidrogeología física (topografía y nivel freático) del área y las características fisicoquímicas, hidrogeoquímicas y las condiciones bacteriológicas del agua en cuerpos acuáticos superficiales y subterráneos en los ecosistemas costeros.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar fisicoquímicamente el agua subterránea a una profundidad establecida en depósitos subterráneos (cenote o pozo), en el manglar, SGD (ojos de agua), en la zona de berma en la playa (pozos de observación), y en la laguna arrecifal, para definir

características químicas del agua en diferentes ecosistemas dependientes del agua subterránea.

2. Definir las características químicas de la columna de agua de los sistemas del cenote inundado y porción marina para para distinguir el comportamiento fisicoquímico a través de la columna de agua de los sitios muestreados.
3. Evaluar las características hidrogeoquímicas del agua en los depósitos agua subterránea (cenote o pozo), en el Manglar, SGD (ojo de agua), en la zona de berma en la playa (pozos de observación) y en los perfiles definidos, para determinar cambios en sus proporciones.
4. Cuantificar la presencia de nutrientes e indicadores bacteriológicos para analizar las condiciones de la calidad del agua en los sitios estudiados.
5. Determinar el flujo preferencial del agua subterránea en el área de estudio mediante mediciones topográficas y del nivel freático para corroborar la dirección del flujo subterráneo.

CAPITULO 2 METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio.

El área de estudio se encuentra ubicado en el Municipio de Puerto Morelos (Figura 2.1), localizado en la región noreste el Estado de Quintana Roo, México. Geográficamente se encuentra entre la latitud $20^{\circ} 57' 0''$ Norte y la longitud de $87^{\circ} 6' 0''$ Oeste. Cuenta con un área de $1043,92 \text{ km}^2$ y se encuentra a 35 km al sur de Cancún y 34 km al norte de Playa del Carmen en el municipio de Solidaridad (Cruz-Coria et al 2013).

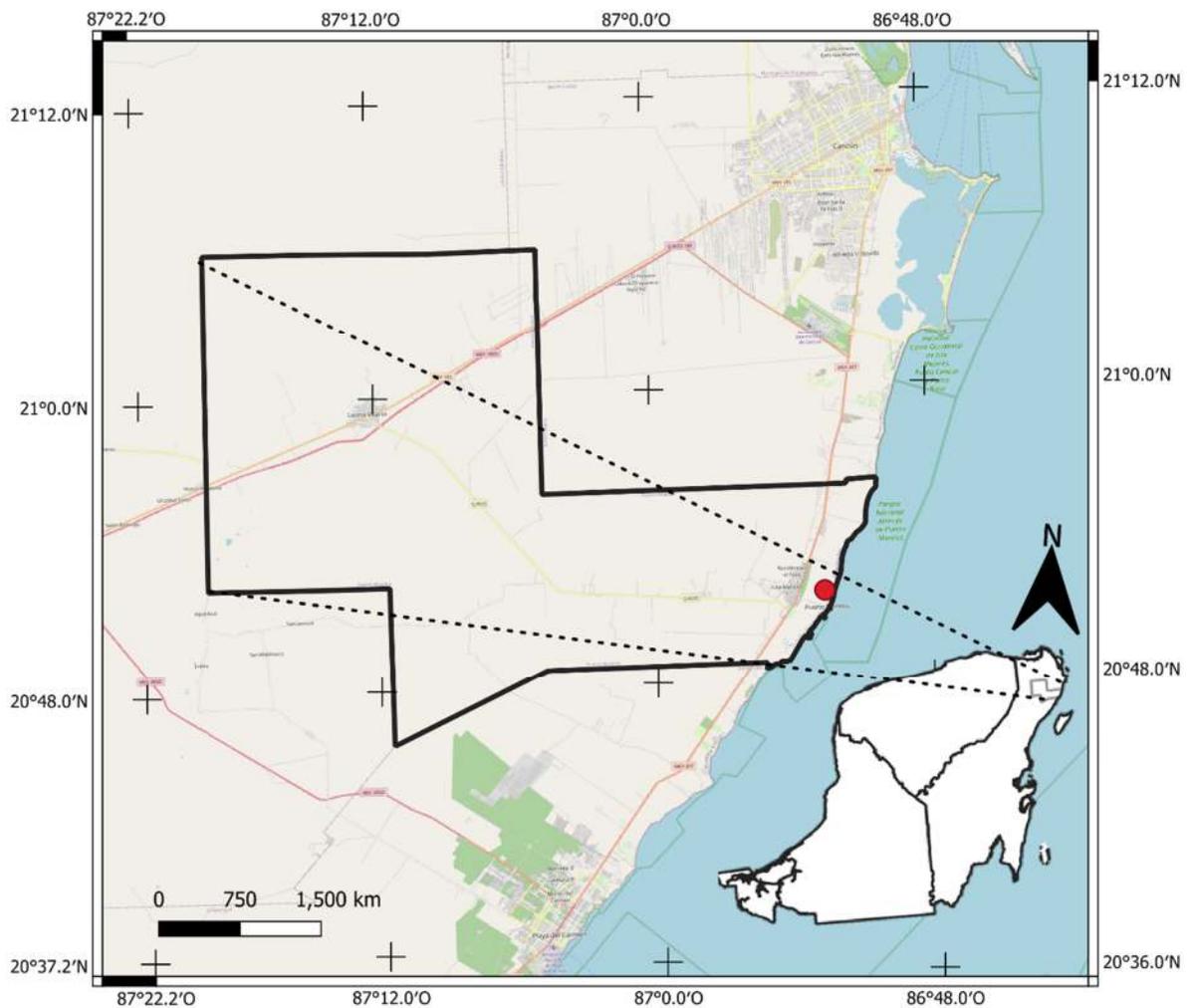


Figura 2.1. Mapa del municipio de Puerto Morelos, elaboración propia.

2.1.1 Clima.

Puerto Morelos presenta un clima cálido a subhúmedo con una temperatura promedio anual de 26.3 °C, tiene máximos en el verano de 35.5°C y mínimos en el invierno de 13°C. La precipitación media anual es de 1,123 mm (Merino y Otero, 1991). El mes más cálido corresponde a agosto con una temperatura máxima de 37.4°C, en enero y febrero las temperaturas más bajas son de 12.9 °C (CONANP y PNUD México, 2020).

De acuerdo con información del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), se muestra el grafico climático del estado de Quintana Roo (Figura 2.2), donde se observa que las precipitaciones registradas definiendo la temporada de estiaje en los meses de febrero-mayo, mientras que la temporada de lluvias empieza desde junio-agosto.

Mientras tanto en el municipio de Puerto Morelos los datos históricos del año 2021 señalan que, en el mes de mayo se detectó un promedio de temperatura de 27.91 °C, en junio de 27.67 °C y en agosto fue de 28.90 °C. En lo que respecta a la precipitación se detectó una acumulación de 0.03 mm en mayo, 0.26 mm en junio y 0.18 mm en agosto (SAMMO, 2022).

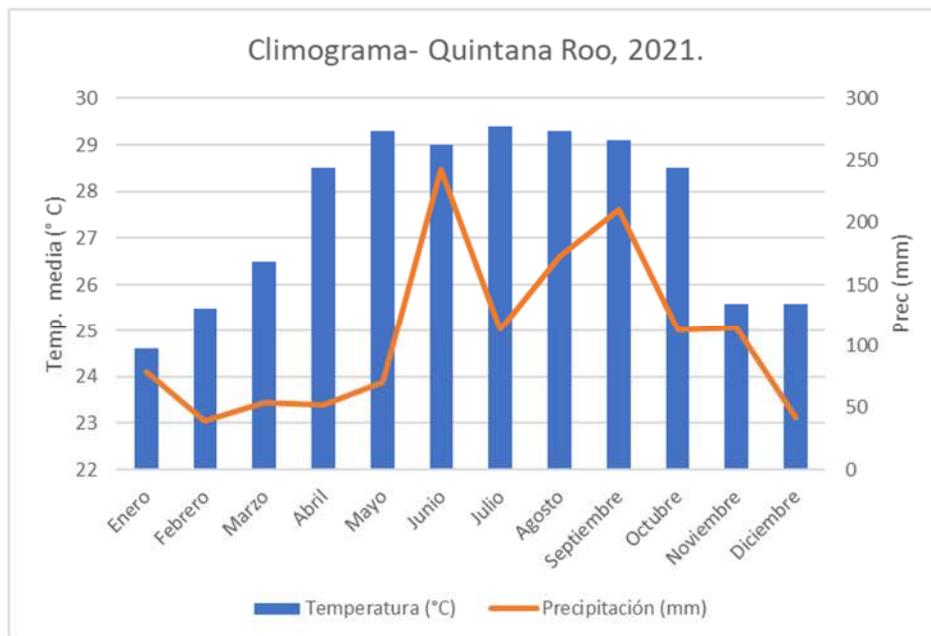


Figura 2.2. Climograma del Estado de Quintana Roo en el año de estudio datos obtenidos de SMN, (2021).

2.1.2 Características geológicas de la zona de estudio.

Con un relieve poco pronunciado la zona de Puerto Morelos cuenta con una elevación máxima de 10 msnm identificada como la colonia Zetina Gazca, para el resto de la región la elevación promedio es de 3 a 5 msnm. Se encuentra situado en la franja costera oriental de la plataforma de la PY sobre rocas carbonatadas con edades desde el Paleoceno hasta Holoceno, la cual está emplazada en un basamento del Paleozoico (Elizondo et al., 2012).

La secuencia geológica de la zona está compuesta por calizas y coquina (boundstone) de edad del Mioceno-Plioceno perteneciente a la Formación de Carrillo Puerto denominados TmplCz-Cq, se extiende por la parte continental de la zona (SMG, 2006), esta unidad está compuesta por calizas fosilíferas en su base y calizas compactas y calizas arenosas en su cima que le proporciona una permeabilidad muy elevada producto de los conductos formados por la disolución de la roca (Elizondo et al., 2012).

Suprayacente a la unidad anterior en la zona costera se encuentran depósitos del cuaternario, las cuales están compuestas de arenisca poco consolidadas constituida de gran cantidad de material biogénico como fragmentos de gasterópodos, pelecípodos, ostras y calcita de edades del Pleistoceno, continuamente hasta la línea de costa se encuentra depósitos palustres denominados Qhopa, formados por limo y arcilla mezclados con materia orgánica, situados desde la parte norte de la zona hasta el sur paralelo al Mar Caribe (SMG, 2006).

Tales depósitos forman una franja de lomas (crestas) alineadas con 150 km de longitud y un ancho de promedio entre 0.5 y 10 km, además que el material consolidado que componen las unidades está constituido de renas de grano fino denominadas calcarenitas presentando una estratificación cruzada (Elizondo et al., 2012).

2.1.3 Características hidrogeológicas de la zona de estudio.

El área de estudio en Puerto Morelos está incluida en la región hidrológica RH32 Yucatán Norte situada en la región norte del estado de Quintana Roo, denominada como la Cuenca 32A con una extensión desde Tulum hasta los límites del estado de Yucatán. Por sus características kárstica y el relieve poco pronunciado, la zona de Puerto Morelos no cuenta con corrientes superficiales, sin embargo, cuenta con pequeños cuerpos de agua superficial llamadas lagunas

costeras como son Conil, Chakmochuk, Nichupté y algunas aguadas (INEGI, 2002). Al no contar con escurrimientos superficiales el drenaje es prácticamente subterráneo.

La zona se encuentra en la región hidrogeológica con rocas con permeabilidad de grado mayor, tiene un comportamiento libre con dirección del flujo hacia el este en su parte media aproximadamente entre Playa del Carmen y Puerto Morelos, en zonas cercanas a Yucatán se dirige hacia el oeste y entre la sección de Kantunilkín e Isla Mujeres se dirige al norte (INEGI, 2002).

2.1.4 Ecosistemas de la zona de estudio.

Los ecosistemas que conforman la zona de estudio en Puerto Morelos están presentes en secciones paralelas a la costa, se encuentra dentro de un polígono delimitado hacia el continente por series de bermas naturales que coinciden con un cambio de la topografía y la vegetación y hacia el mar abierto, el polígono se delimita con el borde de la plataforma continental (Cantil).

Como límites perpendiculares a la costa, se encuentran discontinuidades naturales que, aunque no son tan visibles, logran delimitar de manera clara la zona de estudio, en especial la porción marina (Merino y Otero, 1990). En la zona de Puerto Morelos se encuentra una variedad de ecosistemas desde el continente hacia la porción marina. Para este caso la ruta de cenotes Leona Vicario-Central Vallarta-Puerto Morelos es el comienzo de nuestro transecto y termina hasta los arrecifes del Parque Nacional de Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM).

2.2 Estrategias metodológicas.

Se siguieron dos estrategias metodológicas (Figura 2.3) para cumplir con los objetivos propuestos en la investigación descrita. La primera estrategia recurrió a herramientas de hidrología física, para comprobar la dirección de los flujos del agua subterránea hacia la costa, empleando mediciones topográficas del terreno con un GPS diferencial y la medida del nivel freático con una sonda de nivel.

La segunda estrategia, empleó herramientas hidrogeoquímicas para explicar los posibles procesos que definen las características químicas del agua, así como la cuantificación de concentraciones de nutrientes e indicadores bacteriológicos, para evaluar la condición del agua

subterránea en los distintos depósitos de agua que componen a los ecosistemas costeros del área de estudio.



Figura 2.3. Diagrama de estrategias metodológicas para cumplir los objetivos propuestos en el estudio

2.3 Muestreo.

Se definió un transecto espacial de oeste a este (porción continental - porción marina), buscando que su distribución abarcara las diferentes interconexiones entre la parte geológica de las dolinas (cenotes), las descargas de agua submarina (SGD –Ojos de agua), la mezcla natural que ocurre en manglar, la columna de agua subterránea (pozos) y de agua marina (playa), con la columna de agua de la laguna arrecifal.

El transecto inicia en la localidad de Leona Vicario, pasa por la ruta de cenotes, una sección del manglar, la zona urbana de la costa del Municipio de Puerto Morelos, la berma de la playa, la laguna arrecifal y el arrecife, este último son parches de colonias de corales que se encuentran ubicados dentro de la laguna arrecifal (Figura 2.4).

Se identificaron cinco zonas (Figura 2.5), las cuales fueron denominadas: Zona A (dolinas inundadas o cenotes), Zona B (Manglar), Zona C (Pozo en la zona urbana costera y pozos de observación en playa), Zona D (Laguna arrecifal y Descarga Submarina de Agua subterránea SGD) y Zona E (Arrecife; parches arrecifales dentro de la laguna arrecifal).



Figura 2.4. Mapa del área de estudio.



Figura 2.5. Descripción de los sitios y su correspondiente zona en el transecto espacial de este estudio.

En total se identificaron ocho sitios de muestreo distribuidos en las cinco zonas (Tabla 2.1), se determinó la distancia respecto a la línea de costa, así como la ubicación geográfica obtenida por medio de un Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés) marca Garmin (Datum WGS84), para obtenerse las coordenadas geográficas y la altitud (m) con respecto al nivel del mar de cada sitio

Tabla 2.1. Información general de los sitios de muestreo por zonas (ambas temporadas).

Sitio	Longitud Norte	Latitud Oeste	Distancia costa (km)	Altitud msnm
ZONA A				
Sitio 4.2. Cenote Laguna	20.95021	-87.26679	39.76	10 m
Sitio 4. Cenote Domo	20.98351	-87.20007	36.38	15 m
Sitio 3. Cenote Verde Lucero	20.85018	-87.05027	17.53	22 m
ZONA B				
Sitio 2. Manglar	20.83360	-86.86671	0.5	10 m
ZONA C				

Sitio 1. Pozo Niños Héroes	20.85333	-86.87388	0.24	7 m
Sitio 7. Playa1 (Secas)	20.85008	-87.86675	0.18	4 m
Sitio 7. Playa 2 (Secas)	20.85008	-87.86675	0.18	6 m
Sitio 7. Playa 3 (Secas)	20.85008	-87.86675	0.18	7 m
Sitio 7. Playa1 (Lluvias)	20.85472	-86.87777	0.1629	8 m
Sitio 7. Playa 2 (Lluvias)	20.85472	-86.87777	0.1721	6 m
Sitio 7. Playa 3 (Lluvias)	20.85472	-86.87777	0.1565	8 m
Sitio 8. Punto 7, Laguna Arrecifal	20.848581	-86.87401	0.20	0 m
Sitio 8. Punto 8, Laguna Arrecifal	20.848496	-86.87384	0.40	0 m
Sitio 8. Punto 9, Laguna Arrecifal	20.848398	-86.87368	0.60	0 m
Sitio 8. Punto 10, Laguna Arrecifal	20.848298	-86.87352	0.80	0 m
ZONA D				
Sitio 6. SGD	20.83360	-87.95010	0.120	0 m
ZONA E				
Sitio 5. Arrecife	20.83360	-87.86675	0.150	0 m

Ubicación geográfica en grados decimales y altura (Metros sobre el nivel del mar [msnm]).

2.3.1 Zona A.

Los sitios de la Zona A, correspondientes a los cenotes se encuentran entre 39.7 y 17.53 km de distancia a la costa y se localizan en la ruta de cenotes perteneciente al municipio de Puerto Morelos.

El Sitio 4.2. Cenote Laguna (Figura 2.2 b), aunque algunos lo conocen como “El Corchalito”, es una dolina inundada de forma circular, clasificada geomorfológicamente como cenote tipo abierto con un área de 11,807.13 m² (Pérez-Yáñez, 2020). En dicho cenote se encuentra un humedal dependiente del agua subterránea, que se ha desarrollado a 3 y 4 metros de profundidad respecto al terreno, en el cual la vegetación predominante es la especie *Anona glabra* (Cejudo y Herrera-Caamal, 2019).

El cenote denominado como Sitio 3. Cenote Verde Lucero (Figura 2.6 a), es el más cercano a la costa en la misma ruta de cenotes, cuenta con un área de 1,777.77 m², es un cenote tipo abierto

(Pérez-Yáñez, 2020) con una plataforma menos profunda en su extremo norte. El cenote presenta vegetación arbórea alrededor, así como vegetación acuática del género *Nymphaea*.

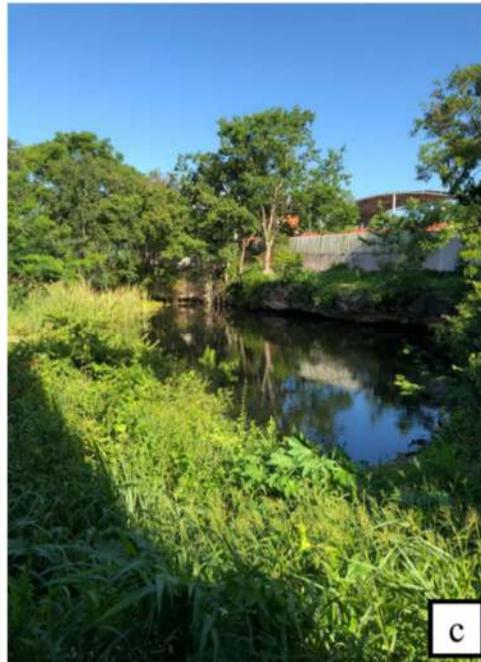


Figura 2.6. Dolinas inundadas en Puerto Morelos, Quintana Roo. Identificados como: a (Cenote Verde Lucero), b (Cenote Laguna Corchalito o Cenote Laguna), c (Cenote Domo). Fotos:

Brianda Patricia Gutiérrez Reveles.

2.3.2 Zona B.

Para efectos del presente estudio, los manglares serán un tipo de vegetación clave, ya que son un ecosistema dependiente del agua subterránea en el transecto espacial definido.

El manglar que se encuentra distribuido en el área de Puerto Morelos abarca desde la selva hacia las dunas costeras, se encuentran en un sitio prioritario con relevancia biológica y con necesidades de rehabilitación ecológica, denominado como PY-69 (Vázquez-Lule y Adame 2009).

Los manglares se pueden clasificar de la siguiente manera: Manglares mixtos: compuestos por cuatro especies de Mangle (*Avicennia germinans*, *Laguncularia racemosa*, *Conocarpus erectus* y *Rhizophora mangle*), las últimas dos especies de manglares mencionados son característicos por encontrarse dispuestos en forma de franja adyacente al matorral costero y se puede apreciar el cambio de vegetación de manera clara. Los manglares son de tipo margoso, es decir desarrollados en un terreno con rocas carbonatadas y arcillas, contiene materia orgánica en descomposición y permanecen inundados casi todo el año (Elizondo et al., 2012).

Manglares con *C. erectus* de tipo franja: se encuentra en el extremo occidental del área de Puerto Morelos, este tipo de asociación de manglar está incorporado en suelos humíferos compuestos de abundante materia orgánica. La salinidad del agua es elevada, aunque recibe aportaciones de agua subterránea y por precipitación pluvial. Comúnmente es una asociación característica de una sola especie, pero se puede encontrar mezclado con la especie *L. racemosa* y *R. mangle* (Elizondo et al., 2012) y finalmente Manglar chaparro de la especie *R. mangle*.

Manglar con *A. germinans* – *Eleocharis cellulosa* pueden ubicarse en la misma área que el tipo de manglar anterior, las condiciones salinas son más bajas (Elizondo et al., 2012). A manera de parches la especie de *E. cellulosa* se encuentra distribuido dando la apariencia de islotes sobre suelos inundados casi todo el año (Carabias-Lillo et al, 2000).

En este estudio se eligió un área de manglar que forma parte de la Zona B, esta se encuentra conformado parte de un sitio Ramsar y presenta ciertos indicios de perturbación (Figura 2.7).

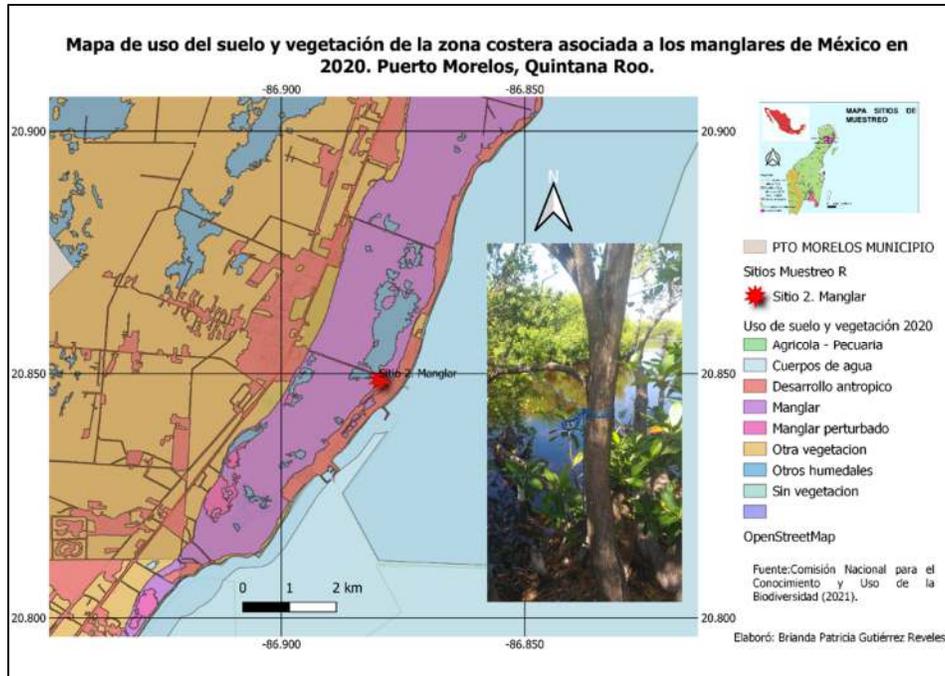


Figura 2.7. Mapa del Sitio 2. Manglar (Puerto Morelos) elaboración propia.

2.3.3 Zona C.

La Zona C, corresponde a la porción de la playa en la zona costera, antes de la duna se encuentra el Sitio 1. Pozo Niños Héroes siendo este, un pozo privado tipo noria de baja profundidad de 3.125 metros. El Sitio 7. Playa, se encuentra después de la duna en la zona de berma de la playa (Figura 2.8).



Figura 2.8. Zona C.

2.3.3 Zona D y E.

En los ecosistemas correspondientes a la porción marina se encuentran un área arrecifal, la cual forma parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) y se ubica dentro del Parque Nacional de Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM), parque que fue decretado el 2 de febrero de 1998 en el Diario Oficial de la Federación (Carabias-Lillo et al., 2000).

Los arrecifes de Puerto Morelos se ubican geográficamente entre las coordenadas 20° 48'33" y 21°00'00" latitud norte, así como entre las 86°53'14.40" y 86°46'38.94" longitud oeste (Carabias-Lillo et al., 2000).

El arrecife es de tipo bordante extendiéndose en forma de barrera, presenta una estructura basal como resultado los eventos geológicos ocurridos durante el Pleistoceno medio y tardío (Ward, 1985). Morfológicamente el arrecife se distingue por componerse de tres zonas (Figura 2.9), entre la costa y la cresta arrecifal la zona I está constituida por una laguna arrecifal y una zona posterior, la zona II es la cresta arrecifal y la zona III o Zona Frontal termina con plataforma arenosa que cae en el talud continental (Merino y Otero, 1990).

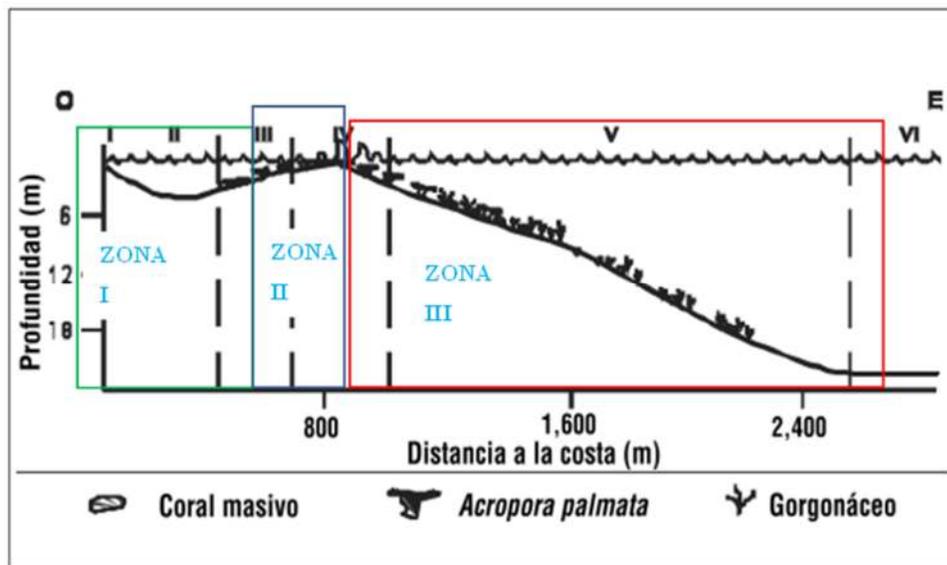


Figura 2.9. Diagrama del perfil de arrecife del área de estudio (Puerto Morelos). Zona I: laguna arrecifal y zona posterior; zona II: cresta arrecifal; zona III: Zona Frontal con plataforma arenosa, tomado y modificado de (Carabias-Lillo et al., 2000).

En la zona del PNAPM desde la línea de costa se encuentra una Zona De pastos marinos dominados por cuatro especies, las más comunes son *Thalassia testudinum*, *Halodule wrightii* o *Caulerpa spp* y *Syringodium filiforme*, al igual se ha reportado 264 especies de algas abundando las algas rizofíticas como son: *Penicillus capitatus*, *Rhipocephalus phoenix*, *R. oblongus*, *Udotea flabellum*, *U. spinulosa*, *Halimeda incrasata* y *Avrainvillea spp* y las macroalgas como *Lobophora variegata* o *Laurencia intricata* entre otras (Carabias-Lillo et al., 2000).

La zona presenta gran abundancia de fauna marina donde se han reportado 669 especies (Carabias-Lillo et al., 2000). Las especies de coral más importantes son el sustrato duro son *Acropora palmata*, así como comunidades de coral dispuestos en montículos donde se encuentran dominancias de especies del género *Orbicella* y *Pseudodiploria*, además de la especie de corales blandos (Caballero et al., 2020).

En la zona posterior se encuentran especies de gorgonáceos como *Pseudopterogorgia americana*, *Gorgonia flabellum*, *Plexaura flexuosa*, *Briareum asbestinum* y *Plexaura homomalla*, y son componentes importantes de la zona (Carabias-Lillo et al., 2000).



Figura 2.10. Arrecife de Puerto Morelos (Los Jardines). Foto: Brianda Gutiérrez.

2.4 Descargas subterráneas (DAS) al mar en Puerto Morelos.

En la Zona Costera del área de Puerto Morelos, se han identificado descargas de agua subterránea al mar. Tales descargas llegan de dos maneras: a través de conductos de disolución que descargan directamente al mar y se denominan descargas submarinas de agua subterránea

(SGD), mientras que las otras descargas se infiltran a través del material que compone la duna (arena) y el frente de playa (Null et al., 2014).

En estudios previos realizados por Terrones et al., (2011), en las SGD, o localmente conocidas como ojos de agua, se han identificado varias en la laguna arrecifal. Para este estudio se eligió un “Ojo de agua”, el cual se encuentra a 150 metros de la línea de costa (Figura 2.11).



Figura 2.11. Descarga submarina de agua subterránea (SGD) en el transecto. Google Earth y foto propia.

2.5 Mareas predominantes en el área de estudio.

En la tabla 2.2, se establece que el régimen de mareas presentes en el área de Puerto Morelos es de tipo mixto semidiurno, de baja amplitud.

Tabla 2.2. Valores estadísticos de las mareas en Puerto Morelos y los datos en el día de muestreo.

Marera	Valor (metros)	Muestreo (12 de mayo del 2021)	Muestreo (25 de agosto del 2021)
---------------	-----------------------	---------------------------------------	---

Pleamar máxima registrada	0.400	0.4 m	0.4 m
Nivel de pleamar media superior	0.205	0.1 m	0.2 m
Nivel de pleamar media	0.170	0.1 m	0.2 m
Nivel medio del mar	0.103		
Nivel de bajamar media	0.017	0.000 m	0.1 m
Nivel de bajamar media inferior	0.000	0.000 m	0.1 m
Bajamar mínima registrada	-0.148	-0.2 m	-0.2 m

Datos registrados en Cancún, Quintana Roo de junio de 1985 a mayo de 1986. Fuente: Tablas de predicción de mareas 1998. Planos de mareas referidos al nivel de bajamar media inferior. Tomado de Carabias-Lillo, (2000), y datos consultados de SMN, (2022).

2.6 Medición de parámetros Fisicoquímicos (*in situ*) y colecta de muestras de agua.

El muestreo se llevó a cabo en dos temporadas, el primer muestro se realizó los días 12, 13 y 14 del mes de mayo del 2021, coincidiendo con el fin de la época de estiaje, por lo cual se le denominó temporada de secas. El segundo muestreo se le denominó temporada de lluvias y se realizó el día. se llevó a cabo el 24 de junio y el día 25 agosto del 2021. En la Figura 2.12 se visualizan las variables propuestas obtenidas en los sitios de cada zona (A, B, C y D).

Los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* fueron pH, Temperatura (Temp. °C), Conductividad Eléctrica (CE; $\mu\text{S}/\text{cm}$), Salinidad (ppt; Oxígeno Disuelto (DO, mg/l) y sólidos disueltos totales (SDT; g/l). Estos parámetros fueron obtenidos por medio de dos sondas: una sonda multiparamétrica marca HYDROLAB® DS5 (Sonda 1) y con una sonda multiparamétrica portátil eXact® pH+ Multi Meter Kit Part No. 486301 (Sonda 2).

Se usaron dos sondas debido a que donde no se pudo usar la sonda HYDROLAB, se colectó muestra de agua con una botella muestreadora horizontal (tipo Van Dorn) o con un dispositivo llamado bailer y luego se colocó el agua en un contenedor limpio para medir los parámetros fisicoquímicos *in situ* con la sonda 2, la cual únicamente proporcionaba lecturas de pH, Temperatura (Temp. °C), Conductividad Eléctrica (CE, $\mu\text{S}/\text{cm}$).



Figura 2.12. Esquema conceptual del plan de muestreo.

De manera simultánea a las mediciones *in situ* de los datos Fisicoquímicos en el agua, en cada sitio se colectaron muestras de agua, para lo cual, se utilizaron varias herramientas: a) botella muestreadora horizontal tipo Van Dorn de 2 litros, b) bailer (dispositivo en forma de cilindro con embolo en la parte inferior para sellar el cilindro cuando se llena de agua) y bomba peristáltica (para el caso de los pozos de observación).

En cada sitio de muestreo se colectaron cuatro muestras de agua para cada análisis y por cada temporada: 1) 150 ml de agua para el análisis de Bacteriología y se almaceno en frascos estériles de polietileno, 2) 250 ml para el análisis de Nutrientes (nitritos, nitratos, amonio, fósforo y sílice) que se almacenaron en botellas de polietileno de alta densidad (HDPE, High Density Polyethylene), 3) para el análisis de elementos mayores se colectaron 250 ml de muestra de agua y se almacenaron en botellas de polietileno de alta densidad (HDPE) y, finalmente, 4) para la alcalinidad se colectaron 125 ml de agua, la cual se almacenó en botellas HDPE.

Todas las muestras se mantuvieron en contenedores con hielo para mantener una temperatura de 4°C para ser transportadas a la Unidad de Ciencias del Agua del CICY en la Ciudad de Cancún.

2.6.1 Muestreo Zona A.

En la porción continental, en las dolinas inundadas (cenotes) de la Zona A, en la temporada de secas, la sonda se bajó a 5 metros de profundidad, para realizar la lectura de los parámetros fisicoquímicos *in situ* (Figura 2.12 a), en la temporada de lluvias, únicamente se midió Temperatura (T° C), Conductividad Eléctrica (CE) y pH *in situ* con la sonda portátil (Figura 2.13 b). La colecta de muestras de agua subterránea en la Zona A, donde se incluyen los cenotes en ambas temporadas, se realizó respecto al nivel freático a 5 metros de profundidad (Figura 2.13).



Figura 2.13. Medición de parámetros fisicoquímicos Sitio 3. Cenote Verde Lucero.

2.6.2 Perfil en la zona A.

Para los perfiles del Sitio 3. Cenote Verde Lucero, incluido en la Zona A, la sonda HYDROLAB® DS5 se colocó por un intervalo de tiempo de 5 minutos cada 0.5 metros en la columna del agua hasta llegar a una profundidad máxima de 9 metros. Con el fin de conocer las condiciones de cambio de temperatura, pH y conductividad eléctrica a profundidad y distinguir el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos a través de la columna de agua.

2.6.3 Muestreo Zona B.

En la Zona B, donde está incluido el Sitio 2. Manglar, se eligió una zona inundada paralela a la carretera por su accesibilidad, la cual según en el Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre la Biodiversidad (SNIB, por sus siglas) tiene la denominación de mangle bajo con predominancia de especies *R. mangle*.

Donde en la columna superficial del agua que inundaba la vegetación, en la temporada de secas, se midió con la sonda HYDROLAB® DS5 (Sonda 1). En la en la temporada de lluvias, únicamente se midió Temperatura (T°C), Conductividad Eléctrica (CE) y pH *in situ* con la sonda portátil con la Sonda 2. Ya que no fue posible usar la sonda 1. Las muestras de agua del Sitio 2. Manglar (Zona B) se colectaron en la porción de la columna de agua superficial (primeros 0.30 m) (Figura 2.14), en referencia a otros estudios realizados en la zona (Hernández-Terrones et al., 2011; Carballo-Parra, 2016).



Figura 2.14. Colecta de muestra de agua Sitio 2. Manglar.

2.6.4 Muestreo Zona C.

En la Zona C, se seleccionó un pozo de agua privado, denominado como Sitio 1. Pozo Niños Héroes, el cual está localizado en la zona urbana cerca de la costa y por motivos de accesibilidad es posible medir su profundidad o nivel estático, el cual se encontraba a una profundidad de 3.12 metros desde la base del brocal. En tal sitio, las muestras de agua se tomaron en la columna de agua con una profundidad de entre 0.80 a 1.00 metro, con la sonda portátil (Sonda 2), (Figura 2.16a).

En la misma Zona C, en la zona de Playa en la Berma se ubicó el Sitio 7. Playa. En este sitio se eligieron tres puntos en la línea de costa, separados entre sí a 10 metros de distancia y ubicados después de la duna de la Playa donde se encuentra la arena aún seca, entre un hotel cercano y a 16, 18 y 20 metros de la línea de costa donde hace espuma la última ola. Ahí se construyeron tres pozos de observación de 0.5 m de profundidad (temporada de secas) y de 0.75m (temporada de lluvias).

En los pozos excavados, se introdujeron tubos de PVC de 15 cm de diámetro con orificios en el fondo a modo de revestimiento para evitar que el pozo colapsara, permitiendo la filtración del agua en el fondo del pozo y con ello obtener las muestras de agua y la lectura de los parámetros *in situ* (Figura 2.15). Las muestras de agua se colectaron accionando manualmente una bomba peristáltica con un tubo de cobre con pequeños orificios en la punta, y de esta forma colecta el agua del fondo del pozo (Figura 2.16b), similar a la metodología usada en el estudio de Lagomasino (2015).

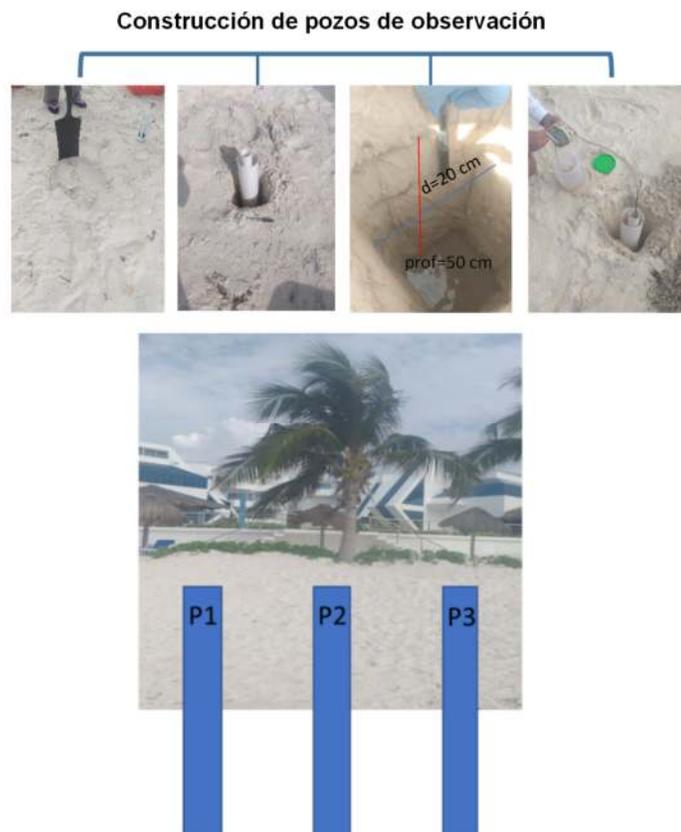


Figura 2.15. Esquema de los pozos de observación excavados en la playa.



Figura 2.16. Medida de parámetros fisicoquímicos *in situ*, (a) Sitio 1. Pozo Niños Héroes y (b) Sitio 7. Playa (Pozos de observación).

2.6.5 Muestreo Zona D.

En la porción marina del transecto se ubicaron las zonas D y E (Figura 2.11). En la zona D se definió el Sitio 8. Laguna Arrecifal, el cual está compuesto por 10 puntos distribuidos a partir de 1.5 metros línea de rompiente hasta llegar a 80 metros en dirección a la cresta arrecifal. Posteriormente, en la misma Zona D, se encuentra el Sitio 6. SGD, el cual corresponde a la descarga submarina de agua subterránea u ojo de agua. Finalmente, se encuentra el sitio denominado Sitio 5. Arrecife, el cual se encuentra 150 metros de la línea de costa hacia la cresta arrecifal, en esta zona se encuentran parches arrecifales (Figura 2.18).

En el Sitio 6. SGD incluido en la Zona D (Figura 2.17b) y Sitio 5. Arrecife, incluido en la Zona E (Figura 2.17a) en la temporada de secas, la sonda HYDROLAB® DS5 se bajó a una profundidad de 5-6 metros manteniéndose ahí por tres intervalos de 10 minutos para realizar las lecturas de los parámetros fisicoquímicos.

Posteriormente las muestras de agua se colectaron utilizando una botella muestreadora horizontal (Van Dorn). Y sólo para las muestras de agua de la SGD (ojo de agua) se requirió del apoyo de buceo con equipo SCUBA

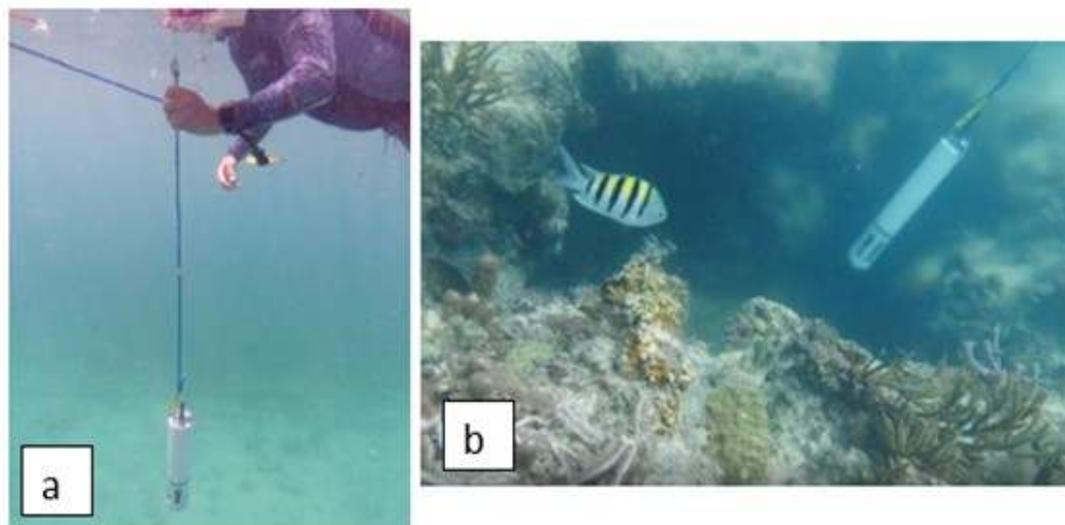


Figura 2.17. Posición sonda multiparamétrica HYDROLAB ® DS5 (a) en el Sitio 5. Arrecife y (b) en el Sitio 6. SGD.

Los perfiles en el Sitio 8. La Laguna Arrecifal y el Sitio 6. SGD (incluido en la Zona D) y el Sitio 5. Arrecife (Zona E), se realizaron en un punto definido a lo largo de un transecto en la laguna arrecifal, siendo perpendiculares a la línea de costa hasta llegar a la SGD y posteriormente al arrecife, esto con la finalidad de poder detectar el efecto “seepage” (Ver Figura 2.18).

Los perfiles del Sitios 8. Laguna Arrecifal y Sitio 6.SGD (Zona D) y el Sitio 5. Arrecife (Zona E), alcanzaron profundidades máximas distintas, dependiendo de la profundidad del fondo marino en el frente de playa, es decir los puntos cercanos a la zona de rompiente (zona surf) donde llega la última ola, alcanzaron menos profundidades que en los perfiles de los puntos más alejados de la costa (hacia el arrecife).

En el Sitio 8. Laguna Arrecifal, los perfiles que se realizaron en los puntos denominados como P1 al P5, la separación entre cada uno de ellos fue de 1.5 metros (Figura 2.18). El siguiente punto denominado como P6 se realizó a una distancia de 15 metros de la costa. El P7 se realizó a 20 metros de la costa y la separación entre puntos posteriormente del P7 fue de 20 metros hasta llegar al Sitio 6. SGD con 120 metros de distancia a la costa. El punto final fue el Sitio 5. Arrecife, que se ubicó a una distancia de 150 metros a la costa (Tabla 2.3).

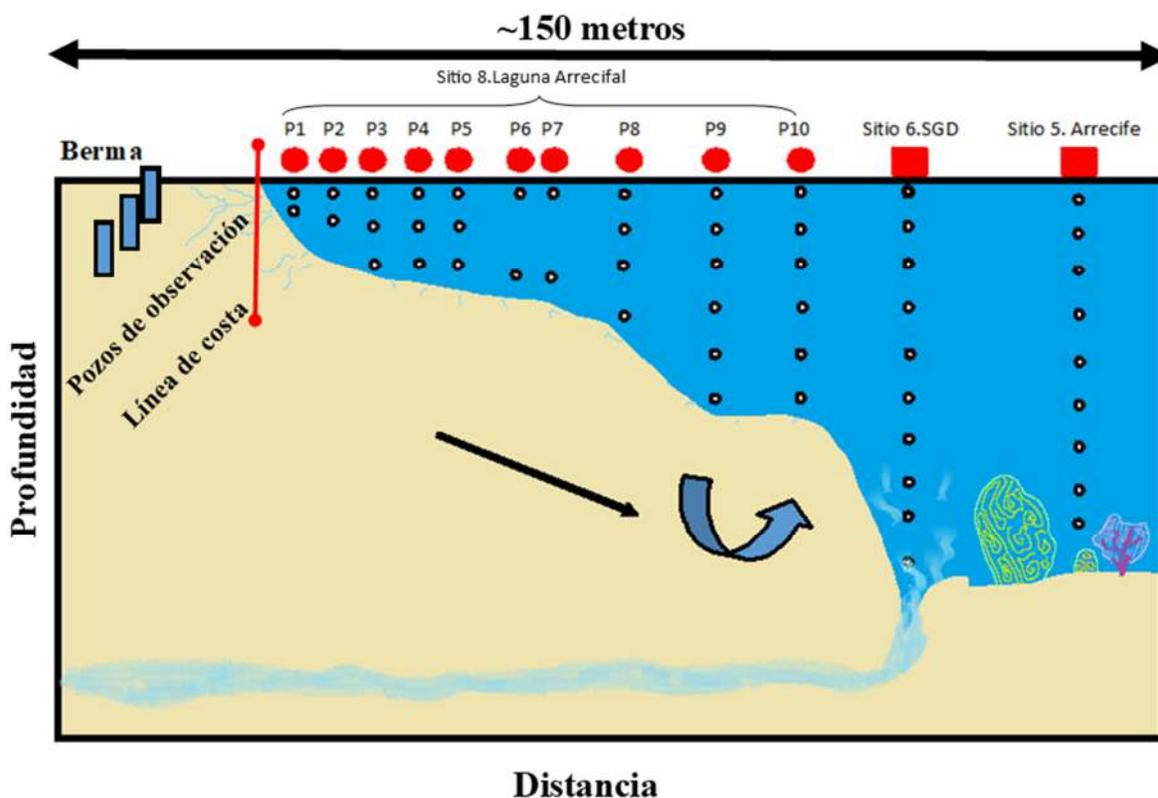


Figura 2.18. Esquema transversal de muestreo de la Zona C, D y E.

Los valores de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* de los perfiles fueron pH, Temperatura (Temp. °C), Conductividad Eléctrica (CE; $\mu\text{S}/\text{cm}$), Salinidad (ppt; Oxígeno Disuelto (DO, mg/l) y sólidos disueltos totales (SDT; g/l). en un perfil de profundidad de la columna de agua en intervalos de 50 centímetros, iniciando la medición casi en la superficie a una profundidad de 0.15 m hasta una profundidad de entre 5-6 metros, usando la sonda HYDROLAB® DS5.

Tabla 2.3. Distancia de los puntos en la Zona D y E, desde la línea de costa.

Identificación de punto	Distancia de la línea de costa hacia el arrecife
Sitio 8. Laguna Arrecifal	
Punto 1 (P1)	1.5 metros
Punto 2 (P2)	3.0 metros
Punto 3 (P3)	4.5 metros
Punto 4 (P4)	6.0 metros

Punto 5 (P5)	7.5 metros
Punto 6 (P6)	15.0 metros
Punto 7 (P7)	20 metros
Punto 8 (P8)	40 metros
Punto 9 (P9)	60 metros
Punto 10 (P10)	80 metros
Sitio 6. SGD (submarine groundwater discharge)	120 metros
Sitio 5. Arrecife	150 metros

Las muestras de agua colectadas en los perfiles del transecto en el Sitio 8. Laguna Arrecifal, Sitio 6. SGD y Sitio 5. Arrecife, fueron a dos profundidades (Tabla 2.4): la primera a 0.15 m desde la superficie corresponde a muestra superficial y a la segunda a la última a la profundidad máxima donde se dio lectura de los parámetros fisicoquímicos con la sonda HYDROLAB® DS5, corresponde a muestra de profundidad (Ver figura 2.19).



Figura 2.19. Colecta de muestra de agua en el mar.

Tabla 2.4. Profundidad de muestreo en la Zona D y E.

Punto	Profundidad de toma de muestra (superficial)	Profundidad de toma de muestra (profundidad)
--------------	---	---

Sitio 8. Laguna arrecifal,	0.15 m	0.5 m
Punto 1		
Sitio 8. Laguna arrecifal,	0.15 m	0.5 m
Punto 2		
Sitio 8. Laguna arrecifal,	0.15 m	1.0 m
Punto 3		
Sitio 8. Laguna arrecifal,	0.15 m	1.0 m
Punto 4		
Sitio 8. Laguna arrecifal,	0.15 m	1.0 m
Punto 5		
Sitio 8. Laguna arrecifal,	0.15 m	0.5 m
Punto 6		
Sitio 8. Laguna arrecifal,	0.15 m	0.5 m
Punto 7		
Sitio 8. Laguna arrecifal,	0.15 m	1.5 m
Punto 8		
Sitio 8. Laguna arrecifal,	0.15 m	2.5 m
Punto 9		
Sitio 8. Laguna arrecifal,	0.15 m	2.5 m
Punto 10		
Sitio 6. SGD	0.15 m	4.5 m
Sitio 5. Arrecife	0.15 m	4.5 m

Profundidad en metros

2.7 Colecta de datos topográficos y nivel freático.

La medición topográfica para conocer el datum de referencia (Figura 2.20), se realizó en algunos de los sitios de muestreo utilizando un GPS diferencial marca Trimble modelo R8s. El método utilizado para las mediciones fue estático (RStatic), el cual consiste en permitir que el Rover móvil permanezca por 40 minutos en el punto para recibir los datos que transmiten más de 8 satélites con una precisión milimétrica y así poder tener una aceptable calidad en los datos.

El nivel freático se midió con una sonda piezométrica o sonda de nivel, para conocer la profundidad de la columna de agua e integrarla con el datum medido con el GPS diferencial al cálculo de la carga hidráulica (Carballo-Parra, 2016). Con esta información se construyó un mapa de isolíneas con el programa QGIS, 3.18.3 Zürich para identificar el flujo preferencial mediante curvas de nivel con las cargas hidráulicas.

En algunos sitios no fue posible medir con el GPS Diferencial, por lo que se recurrió a datos geodésicos verticales obtenidos de La Red Geodésica Nacional Pasiva (RGNP) en el portal de INEGI <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/rqnp/> .



Figura 2.20. Medición de datum de referencia y nivel freático.

2.8 Análisis de laboratorio.

En esta sección se detallarán los análisis realizados en laboratorio a las muestras de agua colectadas en los sitios de muestreo.

2.8.1 Análisis microbiológicos.

Mediante el método cromogénico se realizó el análisis de indicadores bacteriológicos para evaluar la presencia de coliformes totales, fecales y enterococos con el kit Enterolert® para agua marina y Colilert® para coliformes totales y fecales en agua subterránea (Muñoz-Euán, 2019).

2.8.2 Análisis de Nutrientes.

Las concentraciones de los nitritos (NO_2^- /L) se analizaron con el método colorimétrico reacción con sulfanilamida, de acuerdo con la norma NMX-AA-099-SCFI-2006 (2006). Para determinar los nitratos (N-NO_3^-) se recurrió al Método colorimétrico reacción con brucina, siguiendo la técnica EPA 352.1.

Las concentraciones del ion amonio para muestras de agua salada o salobre se analizaron mediante el método de fenato, mientras que para agua dulce (subterránea), se empleó el método salicilato (Parsons, et al., 1984).

Las concentraciones de ortofosfatos totales se determinaron por el método de ácido ascórbico, siguiendo la metodología de EPA-600/4-79-020. Mientras que las concentraciones de sílice se determinaron como ácido silícico con el método colorimétrico, reacción al molibdosilicato, para bajo y alto rango (EPA 353.3).

Todos los métodos empleados para determinar las concentraciones de los iones asociados con los nutrientes prospectados se corrieron con las curvas de calibración correspondientes para cada método, procurando obtener los valores de la pendiente y ordenada al origen y de la ecuación de regresión R^2 sea de lo más cercano a 1. Todas las cuantificaciones de las concentraciones de nutrientes de las muestras de agua se llevaron a cabo usando la técnica de espectrofotometría de luz UV-VIS con el equipo Thermo Evolutions 60S.

2.8.3 Análisis de Alcalinidad.

La alcalinidad en las muestras de agua se determinó por el método de Gran (Figura 6.21), el cual consiste en realizar una titulación con ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0.1600±0.0008 N contenidos en ampollas, los cuales se colocan en un titulador digital marca HACH modelo AL-DT.

Al agregar unidades de ácido se medía el pH con un potenciómetro marca Scientific® Accumet® modelo XL60. Se siguieron las indicaciones del fabricante y la normatividad (USGS, 2006). Posteriormente los datos se colocaron en una plantilla de Excel prediseñada para calcular la alcalinidad como concentraciones de carbonatos de calcio (HCO_3^-).



Figura 2.21. Procedimiento de análisis de alcalinidad.

2.8.4 Análisis de Elementos Mayores.

Las cuantificaciones de elementos mayores: cationes Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Sodio (Na^+), Potasio (K^+) y aniones Cloruros (Cl^-), Sulfatos (SO_4^{2-}) se realizaron por el método de cromatografía iónica en un cromatógrafo iónico modelo 882 Compact IC Plus y un detector de conductividad eléctrica modelo IC Conductivity Detector de Metrohm (CE), para esto se utilizó una columna tipo Metrosep A 4 250/4 con una precolumna tipo Metrosep R2 Guard 3.5.

Para analizar los aniones se empleó una fase móvil compuesta de 12.6mM Na_2CO_3 /11.9mM NaHCO_3 , la cual fue preparada con los reactivos de la marca Sigma Aldrich reportada con una pureza de >99.5%, mientras que para los cationes se recurrió a la fase móvil compuesta de Ácido nítrico 2.7 mM/Ácido dipicolínico preparada con reactivo ácido nítrico concentrado ultrapuro (99.999% trace metals basis) y reactivo ácido dipicolínico de la misma marca Sigma Aldrich.

2.9 Análisis de Datos.

Los resultados se llevaron primero a un análisis estadístico descriptivo por variable para detectar distribuciones de los datos entre los sitios, así como la variación entre las tres muestras que se colectaron en cada sitio por cada temporada. Se construyeron graficas de cajas y bigotes (boxplot) para observar de manera gráfica la valores y analizar el comportamiento estadístico de los valores.

Se construyeron diagramas de Durov (Lloyd y Heathcoat, 1985) y graficas de dispersión, para determinar los grupos de agua y los principales procesos químicos que se pudieron relacionar con las concentraciones de elementos mayores de las muestras de agua (González-Herrera et al. 2018, Smith et al., 2020).

Se realizó un análisis de conglomerados o Clúster y análisis multivariados de tipo Escalamiento Multidimensional (MDS), para detectar agrupaciones en relación con el sitio y todas las variables medidas (Smith et al., 2020).

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de parámetros fisicoquímicos *in situ*.

En las tablas 3.1 y 3.2, se muestran los datos colectados *in situ*, correspondiente a la temporada de secas y a la temporada de lluvias. Los sitios contemplan la porción del transecto en tierra y en costa. El orden de los sitios se distribuye desde el sitio más alejado al interior del continente hasta llegar a la laguna arrecifal dentro de la porción marina.

Se reportan los valores promedio obtenidos durante la colecta de tres muestras de agua en cada sitio (los resultados de cada muestra son de 10 lecturas tomadas *in situ*), en el caso del Sitio 7. Playa, los datos son de las muestras de agua obtenidas en cada pozo de observación y se expresan como muestras independientes.

Tabla 3.1. Parámetros fisicoquímicos de los sitios de estudio, incluidos en cada zona en la temporada de Secas.

Sitio	Temp. [°C]	pH	CE [μS/cm]	Salinidad [ppt]	TDS [g/l]	DO [mg/l]
ZONA A						
*Sitio 4.2. Cenote Laguna	26.64	7.33	640.83	0.33	0.40	1.21
*Sitio 4. Cenote Domo	25.38	6.86	785.43	0.41	0.50	0.27
*Sitio 3. Cenote Verde Lucero	26.08	7.06	1,093.10	0.57	0.70	1.31
ZONA B						
*Sitio 2. Manglar	28.99	7.36	6249.03	3.46	4.00	0.56
ZONA C						
**Sitio 1. Pozo Niños Héroes	29.88	7.84	1,035.00	N/A	N/A	N/A
**Sitio 7. Playa 1	28.00	7.99	2,460.00	N/A	N/A	N/A
**Sitio 7. Playa 2	29.27	7.90	1,532.00	N/A	N/A	N/A

**Sitio 7. Playa 3	29.22	8.30	702.00	N/A	N/A	N/A
ZONA D						
*Sitio 6. SGD	28.11	7.86	44,414.63	28.74	28.43	5.11
ZONA E						
*Sitio 5. Arrecife	28.61	8.00	47,643.17	31.09	30.50	6.92

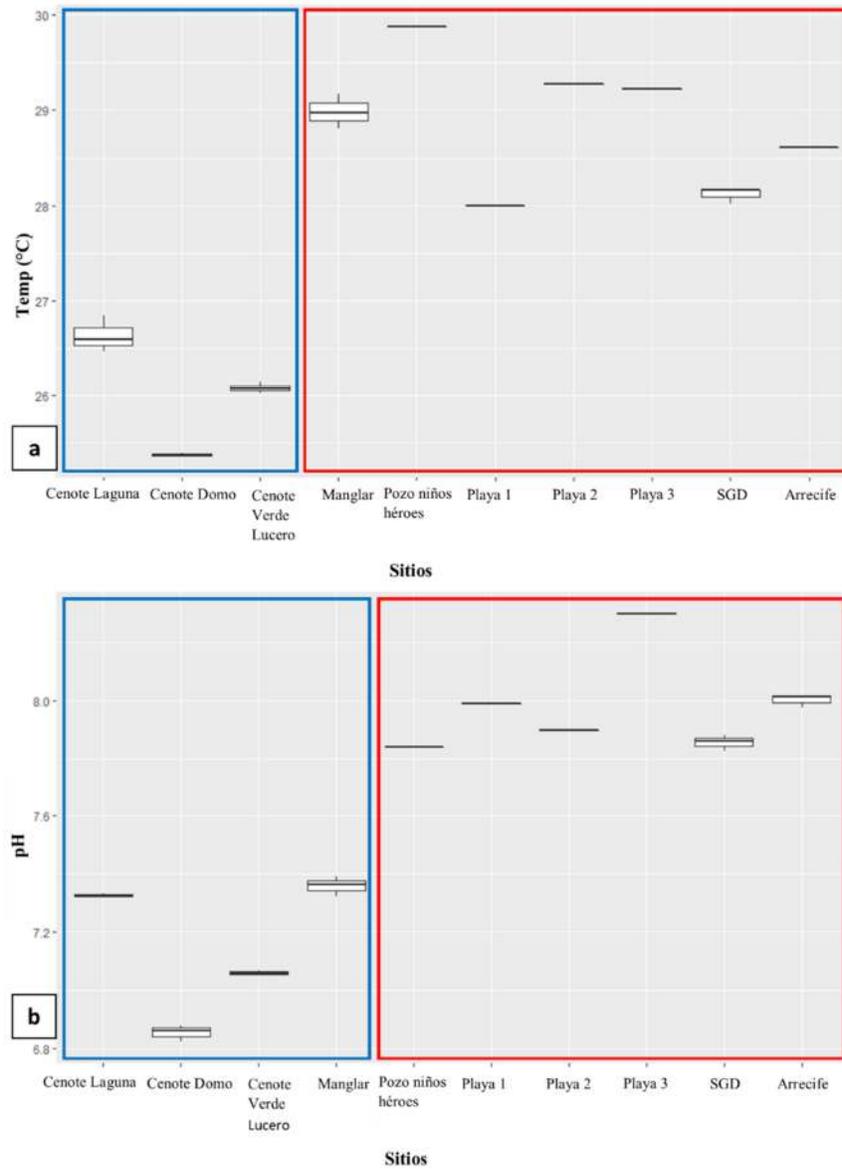
Nota: (N/A) parámetro no medido, *lecturas medidas con sonda HYDROLAB ® DS5 y ** lecturas con sonda portátil eXact®.

Tabla 3.2. Parámetros fisicoquímicos de cada sitio de estudio, incluidos en cada zona en la temporada de Lluvias.

Sitio	Temp. [°C]	pH	CE [µS/cm]	Salinidad [ppt]	TDS [g/l]	DO [mg/l]
ZONA A						
**Sitio 4.2. Cenote Laguna	31.28	7.32	595.00	N/A	N/A	N/A
**Sitio 4. Cenote Domo	28.04	6.58	909.00	N/A	N/A	N/A
**Sitio 3. Cenote Verde Lucero	28.67	6.95	1205.67	N/A	N/A	N/A
ZONA B						
**Sitio 2. Manglar	32.10	7.19	6210.00	N/A	N/A	N/A
ZONA C						
**Sitio 1. Pozo Niños Héroes	29.00	7.05	1300.00	N/A	N/A	N/A
*Sitio 7. Playa 1	30.81	7.78	13061.56	7.51	8.40	0.00
*Sitio 7. Playa 2	30.82	7.69	20827.60	12.43	13.34	0.00
*Sitio 7. Playa 3	30.58	7.92	16688.20	9.77	10.70	0.00
ZONA D						
*Sitio 6. SGD	29.27	8.35	45682.96	29.67	29.24	4.59
ZONA E						
*Sitio 5. Arrecife	29.53	8.43	47807.90	31.21	30.60	5.81

Nota: (N/A) parámetro no medido, *lecturas medidas con sonda HYDROLAB ® DS5 y ** lecturas con sonda portátil eXact®.

Tomando en cuenta los resultados de las tablas anteriores, se construyeron gráficas para cada variable, lo que representa la distribución espacial de los parámetros fisicoquímicos entre los sitios. En estos gráficos se pueden observar que existen dos grupos basándose en los valores de las variables de parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* (Figura 3.1 y 3.2). Estos grupos son diferentes dependiendo de la temporada.



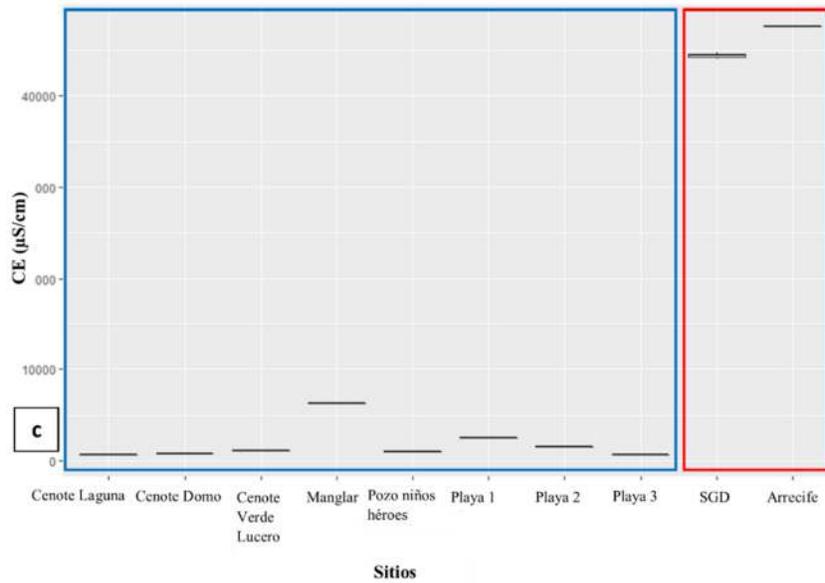
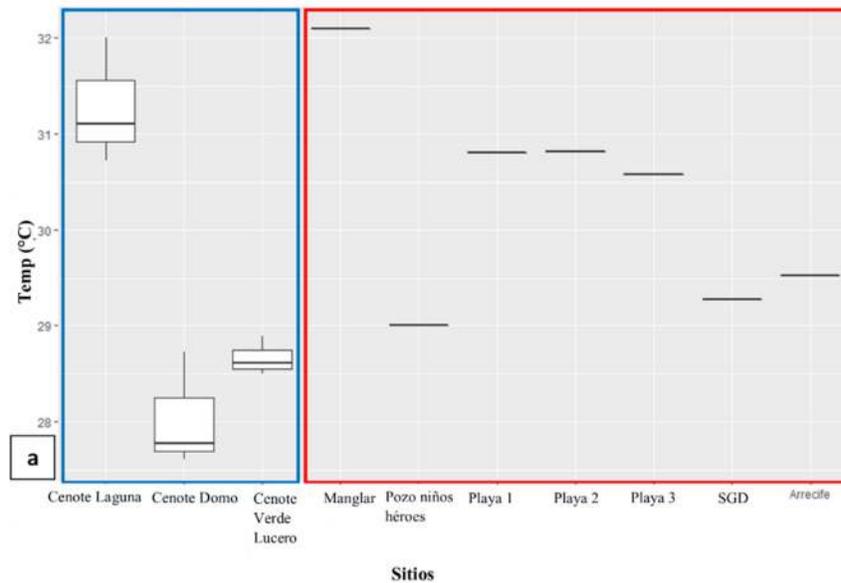


Figura 3.1. Gráficas de parámetros fisicoquímicos medidos in situ de la temporada de secas. a) temperatura, b) pH y c) conductividad eléctrica. Variación espacial de los parámetros fisicoquímicos en los ambientes muestreados y formación de grupos (I y II).



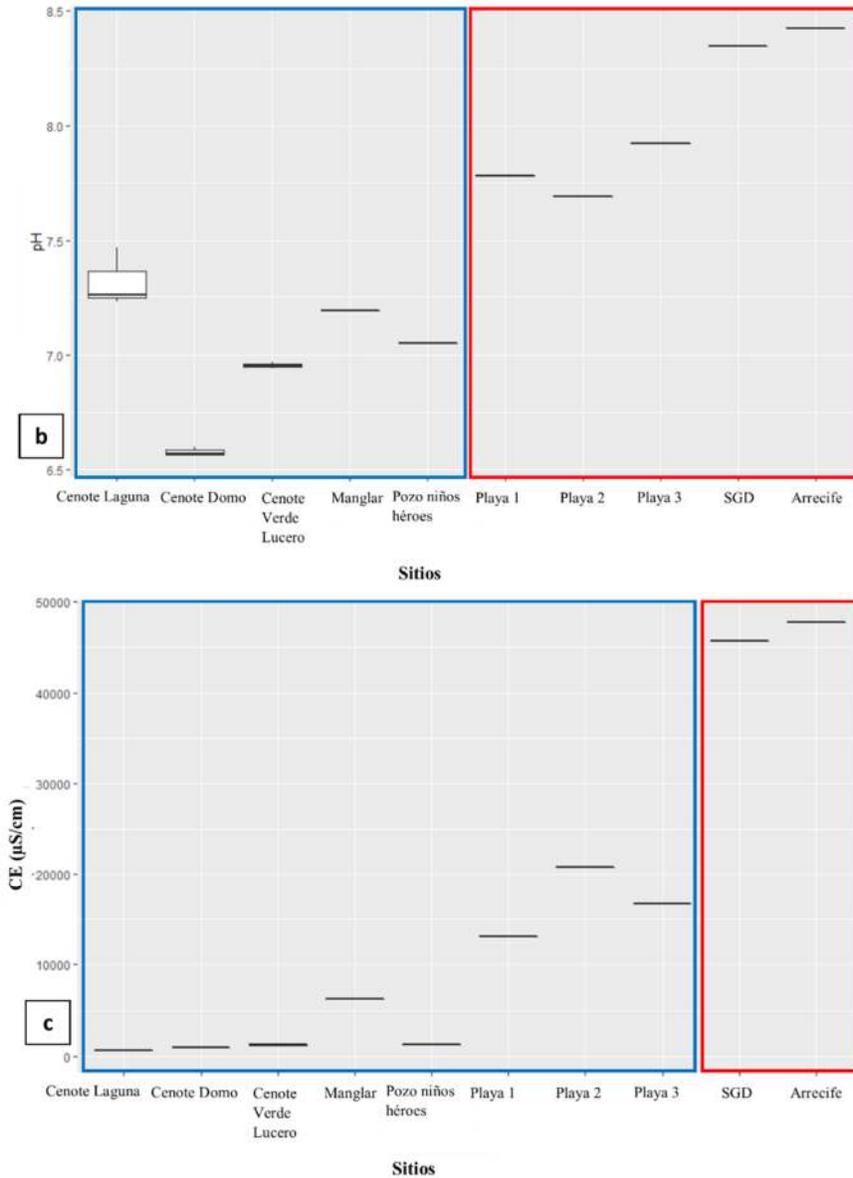


Figura 3.2. Gráficas de parámetros fisicoquímicos medidos in situ de la temporada de lluvias. a) temperatura, b) pH y c) conductividad eléctrica. Variación espacial de los parámetros fisicoquímicos en los ambientes muestreados y formación de grupos (I y II).

3.1.1 Temperatura.

El gráfico de la temperatura del agua en temporada de secas define dos grupos de cuerpos de agua, cada grupo está compuesto de aquellos sitios que presentan valores de temperatura

similar, por ejemplo, el Grupo I denota un rango de temperatura de 25.0 a 27.0°C, siendo los sitios de la Zona A (Sitio 4.2. Cenote Laguna, Sitio 4. Cenote Domo y el Sitio 3. Cenote Verde Lucero) los que lo componen, mientras que el resto de los sitios desde Zona B (Sitio 2. Manglar) hasta la Zona E (Sitio 5. Arrecife) oscilan sus temperaturas en un rango de 28.0-30.0°C formando el Grupo II y la temperatura es mayor que la del Grupo I.

En la temporada de lluvias ocurre algo similar sólo que, en el Grupo I, el sitio denominado Sitio 4.2. Cenote Laguna tiene un incremento en la temperatura a 31.3 °C y en el Grupo II, el Sitio de la Zona C, (Sitio 1. Pozo Niños Héroes) muestra temperatura menor de 29.0 °C que el resto de los sitios, similar a los sitios de la Zona A, donde se encuentran los cenotes.

3.1.2 pH.

En el caso del pH, también se definen dos grupos. En la temporada de secas el Grupo I se compone por los sitios de la Zona A (Sitio 4.2. Cenote Laguna, Sitio 4. Cenote Domo y el Sitio 3. Cenote Verde Lucero) y el Sitio 2. Manglar (Zona B), presentan un rango de pH entre 6.86 y 7.36, siendo menores que los sitios del Grupo II, desde la Zona C, donde se incluye el Sitio 1. Pozo Niños Héroes y el Sitio 7. Playa hasta la Zona E, con el Sitio 5. Arrecife, se detectan valores de pH más básicos en un rango de 7.84 a 8.30, este pH representa condiciones de ambientes marinos.

También en la temporada de lluvias se observa ese patrón, sin embargo, los valores de pH disminuyeron ligeramente y el Sitio 1. Pozo Niños Héroes se incluyó en el Grupo I, ya que su pH se registró casi al nivel del pH de los cenotes con un pH de entre 6.86 y 7.36.

3.1.3 Conductividad eléctrica (CE).

Los valores de CE definen dos grupos de sitios. En ambas temporadas en el Grupo I es donde se detectan condiciones de agua subterránea, ya que los valores de CE desde los sitios de la Zona A (Sitio 4.2. Cenote Laguna, Sitio 4. Cenote Domo y el Sitio 3. Cenote Verde Lucero) hasta los pozos de observación del Sitio 7. Playa en la Zona C, en temporada de secas están en un rango de 785.43 y 6249.03 µS/cm y en temporada de lluvias es de 595.00 a 20827.60 µS/cm.

En la Zona B (Sitio 2. Manglar), los valores de CE se detectan por arriba de 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, volviendo a disminuir en la Zona C, donde se incluye el Sitio 1. Pozo Niños Héroes y Sitio 7. Playa se vuelven a detectar valores de conductividad menores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En el caso de las muestras de agua del Sitio 7. Playa, se detectaron valores de CE en un rango de 702 $\mu\text{S}/\text{cm}$ como mínimo y como máximo de 2460 $\mu\text{S}/\text{cm}$, donde la muestra de la Playa 3, tuvo el menor valor, siendo similar a los sitios 4.2 Cenote Laguna y 4. Cenote Domo. La variabilidad entre las tres muestras de agua colectadas en el Sitio 7. Playa, indica que el agua de dichas muestras tiene valores de conductividad eléctrica características al agua subterránea y son similares a los sitios de la Zona A, que incluye el Sitio 4.2. Cenote Laguna, Sitio 4. Cenote Domo y el Sitio 3. Cenote Verde Lucero.

En la temporada de lluvias (Figura 3.2 b), se detecta un patrón similar a la temporada de secas, donde los valores de CE de las muestras de agua de cada zona y los sitios son similares entre temporadas, sin embargo, en la Zona C en el Sitio 7. Playa, se detectan aguas características de zona de mezcla con condiciones o influencias de agua marinas, ya que los valores se registraron entre los 13061.56 y 20827.60 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En la temporada de lluvias (Figura 3.2 c), se detecta un patrón similar a la temporada de secas, donde los valores de conductividad eléctrica de las muestras de agua de cada zona y los sitios son similares entre temporadas, sin embargo, en la Zona C en el Sitio 7. Playa, se detectan aguas características de zona de mezcla con condiciones o influencias de agua marinas, ya que los valores se registraron entre los 13061.56 y 20827.60 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Para el caso de los ambientes marinos que definen al Grupo II, en la Zona D con el Sitio 6. SGD en ambas temporadas, los valores se registraron por arriba de 40000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, menor a la CE detectada en la Zona E del Sitio 5. Arrecife, con valores entre 47000 y 47500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

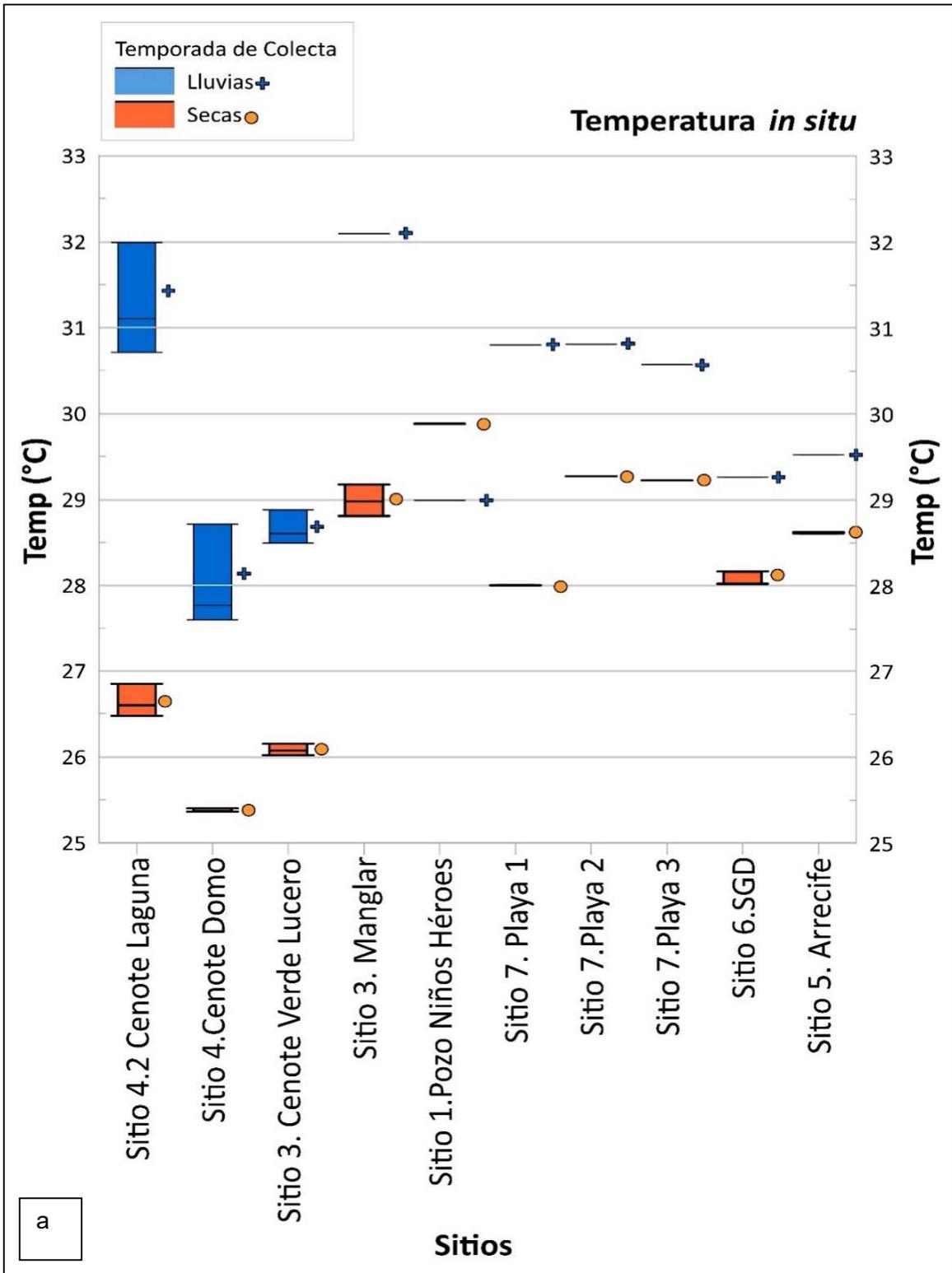
Aunque los valores de CE representan las condiciones de agua de mar, cuyos valores son alrededor de 45000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en la descarga submarina de agua subterránea definida como el Sitio 6. SGD, se detectan menores valores que en el Sitio 5. Arrecife. En la figura 3.3 se resumen los valores de temperatura, CE y pH.

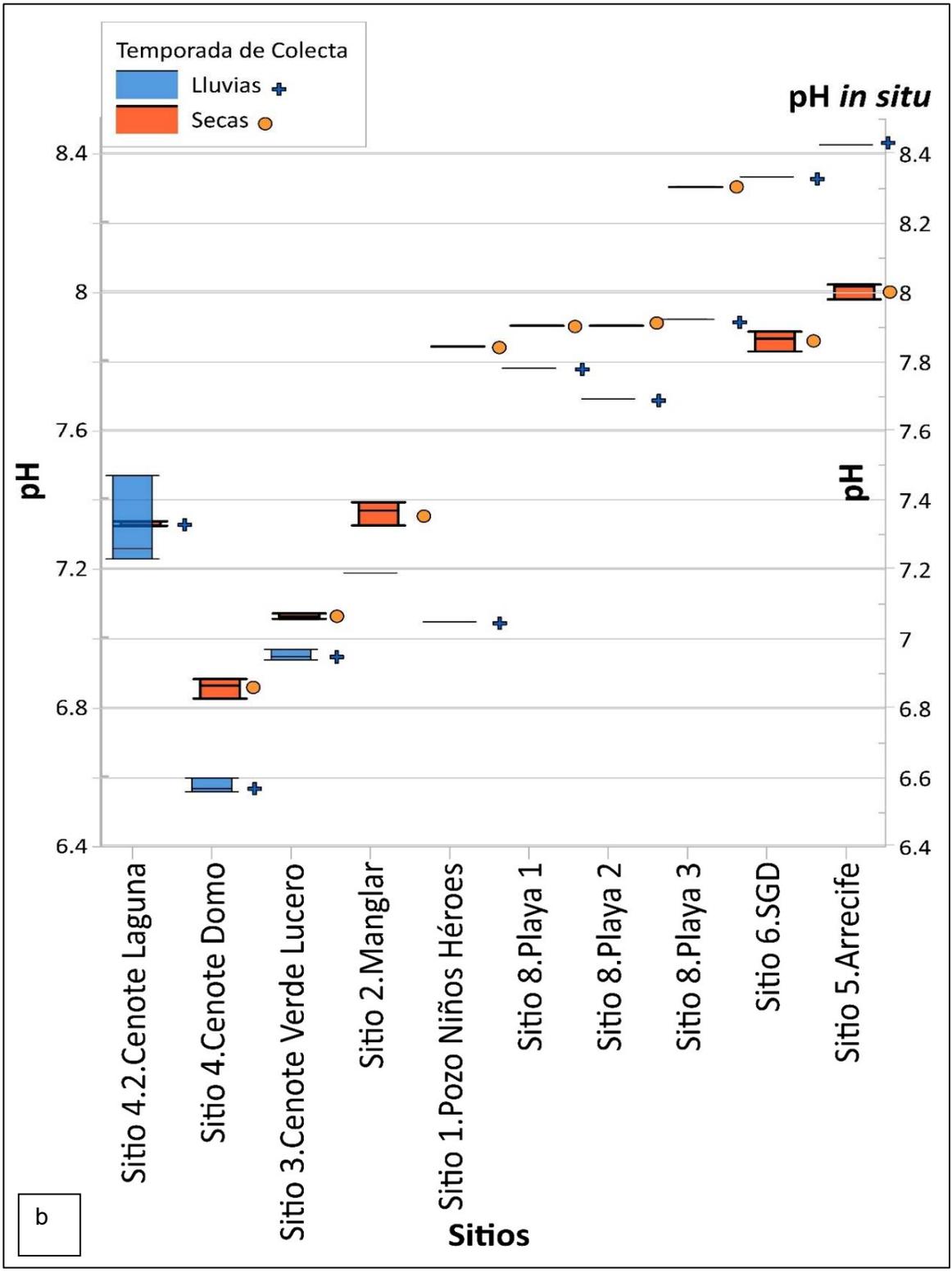


Figura 3.3. Resumen de datos de cada sitio en cada zona, los valores en negro representan los rangos de temporada de secas y los valores en rojo representan los rangos de temporada de lluvias.

3.2 Distribución temporal de los valores de los parámetros fisicoquímicos (Temperatura, pH y Conductividad eléctrica) in situ.

A continuación, se muestra el comportamiento de manera temporal de los parámetros fisicoquímicos, en la época de secas y lluvias (Figuras 3.4 a, b y c).





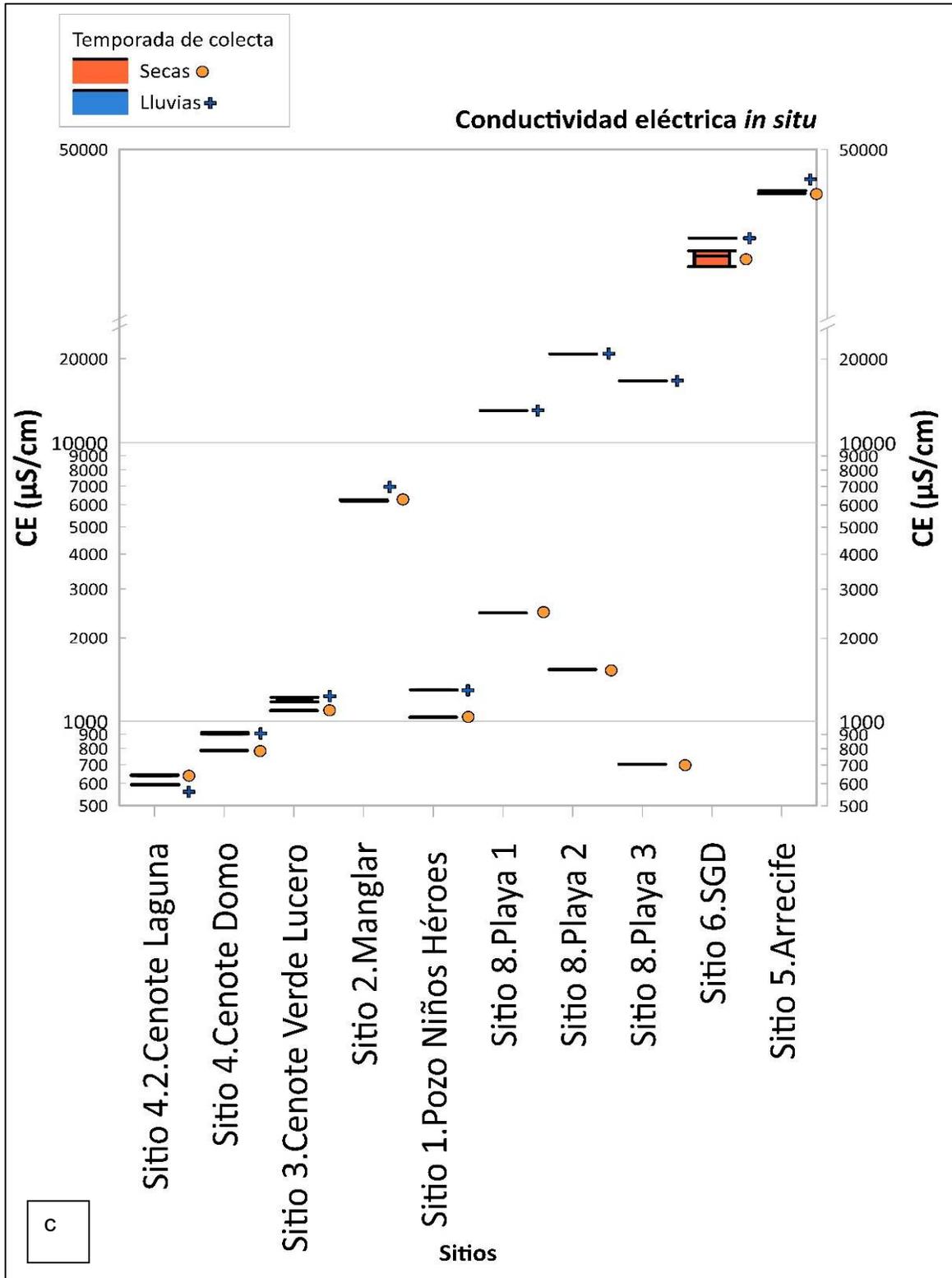


Figura 3.4. Gráficas de parámetros fisicoquímicos *in situ*: a) temperatura, b) pH y c) conductividad eléctrica (CE), en las temporadas de secas y lluvias.

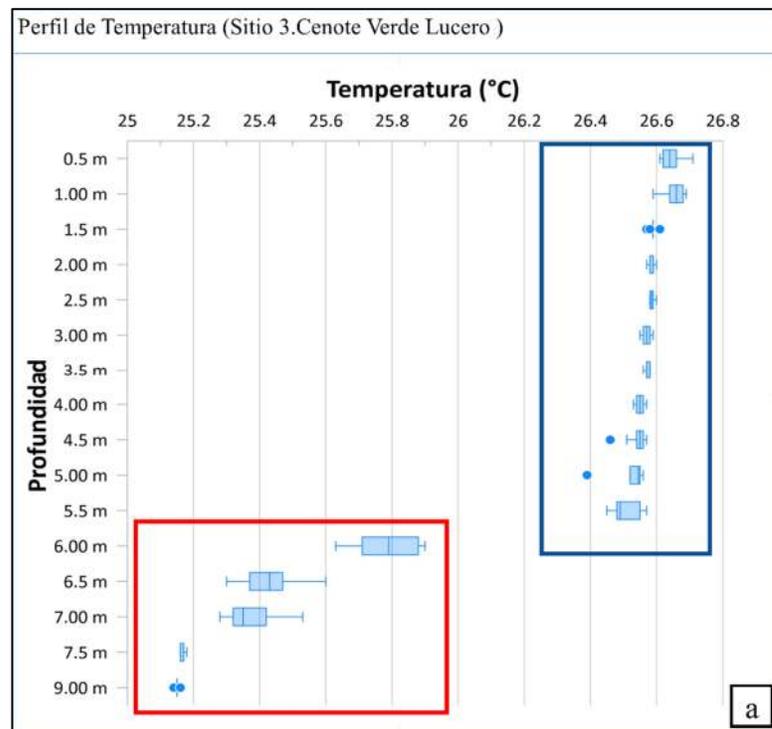
3.3. Resultados de parámetros fisicoquímicos in situ de Perfiles.

En esta sección, se presentan las condiciones de cambio de temperatura, pH y conductividad eléctrica (CE) a diferentes profundidades, para las zonas A, D y E (Ver Figuras 3.5 y 3.6 a, b y c). Con el fin de distinguir el comportamiento de los parámetros fisicoquímicos a través de la columna de agua de los sitios de muestreo.

La profundidad máxima de cada uno de los perfiles que se realizaron fue en función de las características físicas de cada uno de los sitios (cenote, manglar o lecho marino).

Perfiles ZONA A.

En los perfiles de la Zona A, se aprecia una disminución a cierta profundidad en lo que se refiera a la temperatura y pH, mientras que la CE incrementa a una profundidad de aproximadamente 5m.



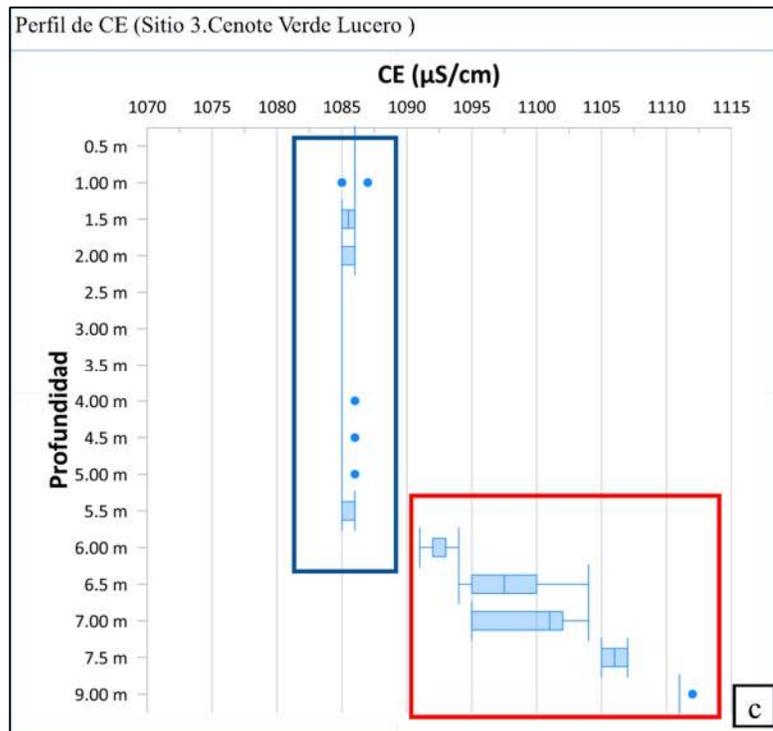
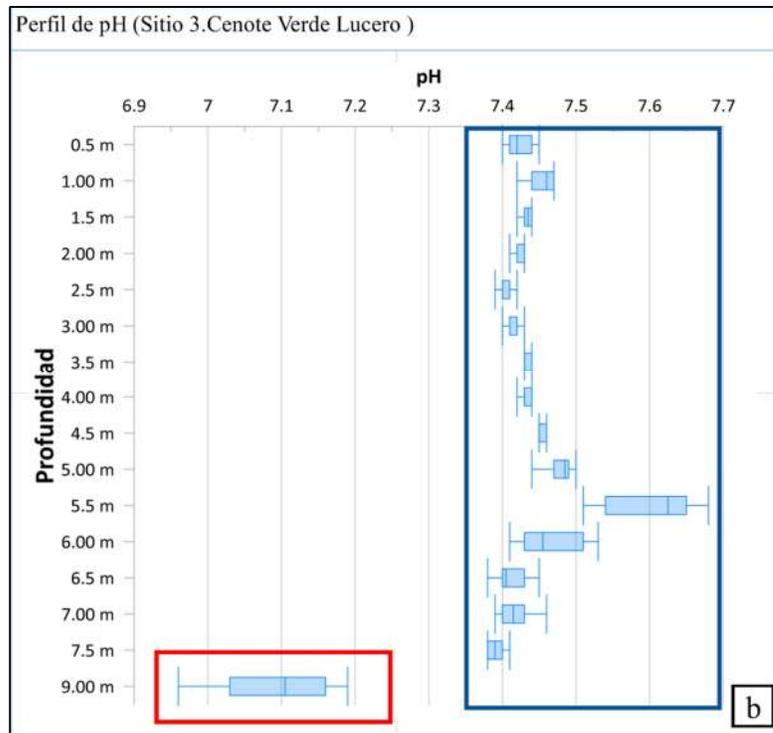
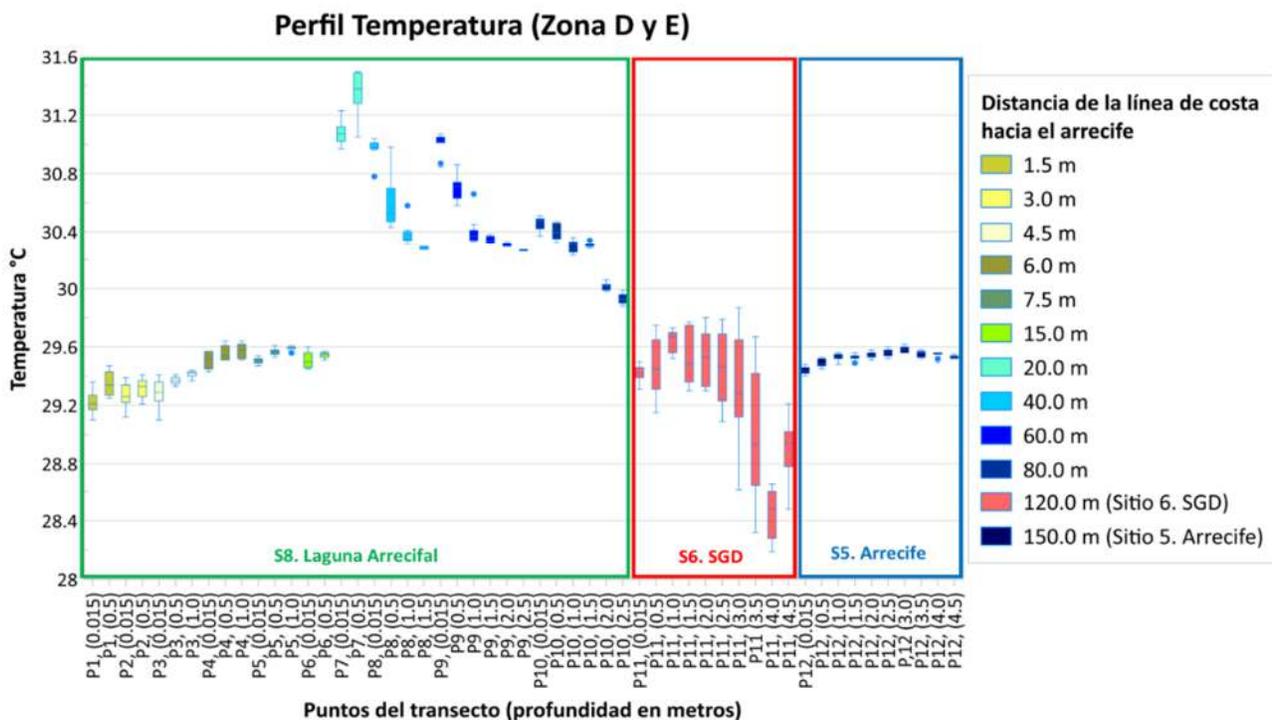


Figura 3.5. Perfiles del Sitio 3. Cenote Verde Lucero: a) Temperatura; b) pH; c) conductividad eléctrica (CE).

Perfiles de zonas D y E.

Las siguientes gráficas muestran la distribución espacial con relación a la longitud lateral (distancia) y en vertical (profundidad), de los parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* durante la temporada de secas y lluvias, en la porción marina del transecto. Dentro de esta porción se encuentra la Zona D con el Sitio 8. Laguna Arrecifal y Sitio 6. SGD y termina en la Zona E con el sitio identificado como Sitio 5. Arrecife. De acuerdo con la metodología, los puntos de los perfiles iniciaron a 1.5 metros después de la línea de costa, donde empieza el frente de playa y terminaron a 150 metros de distancia del punto inicial, llegando al área donde se encuentran parches arrecifales pequeños con colonias de corales.

En las gráficas de la figura 3.6 se pueden observar claramente el cambio gradual de los valores de temperatura, pH y CE, siendo menores en los puntos cercanos al frente de playa. En la zona de SGD (sitio s6. SGD) se observa una alta variabilidad de los datos lo que refleja una posible mezcla de agua de diferentes fuentes (agua dulce y salada). Posteriormente en el arrecife se nota que los valores no presentan gran variabilidad manteniendo similar en todos los sitios del perfil realizados en la columna de agua.



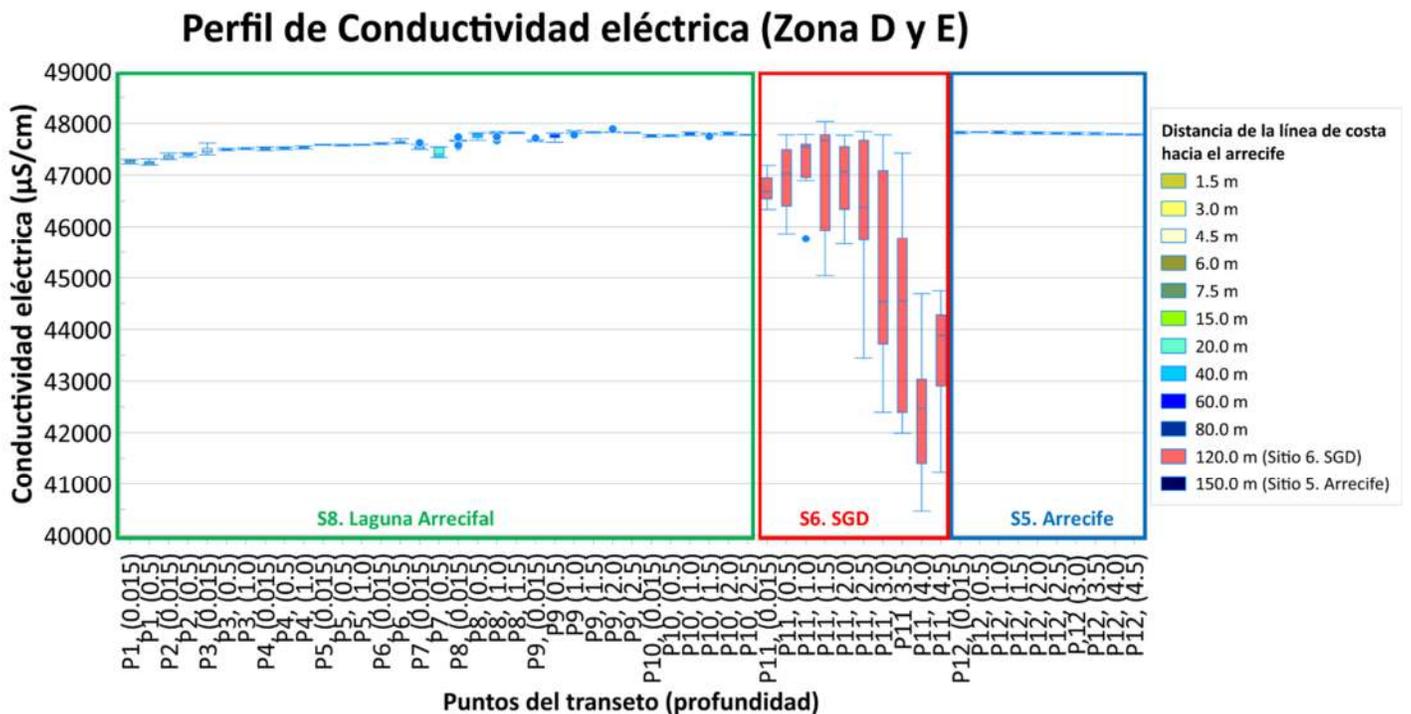
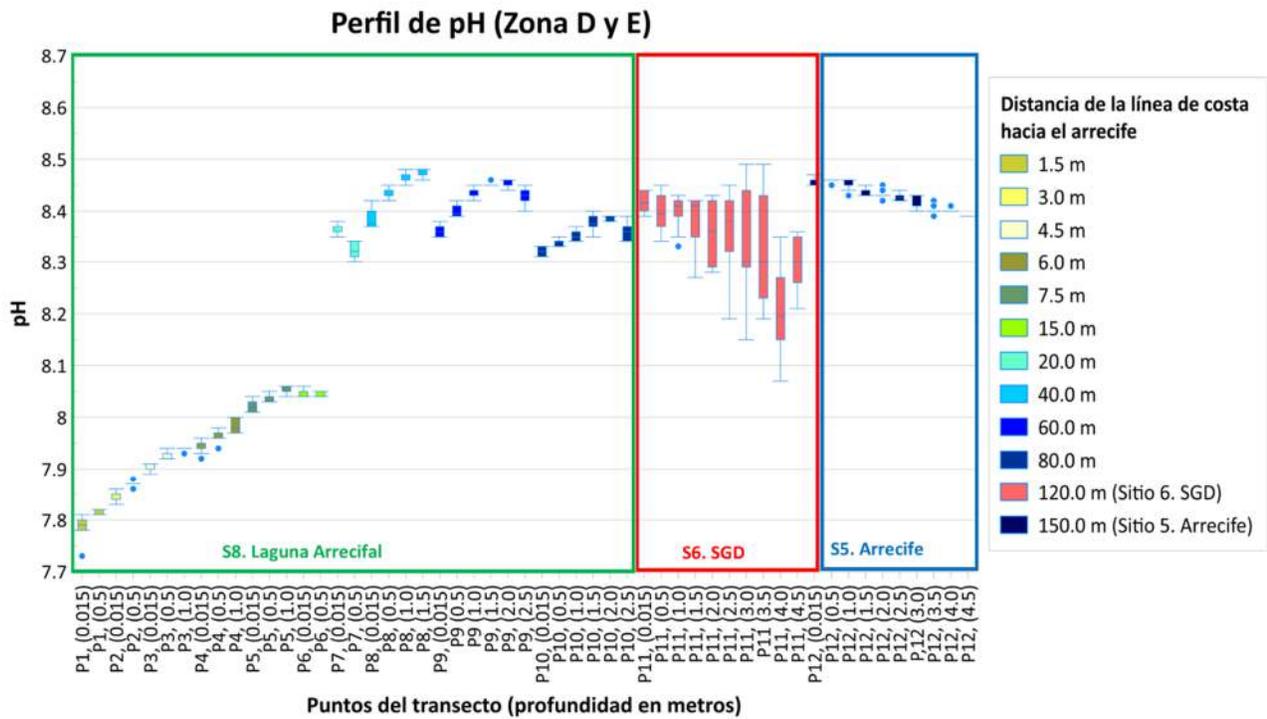


Figura 3.6. Perfiles de la porción marina del transecto definido desde la línea de costa hasta el sitio 5. Arrecife: a) Perfil de Temperatura; b) Perfil de pH y c) Perfil de conductividad eléctrica (CE).

3.4 Resultados de Alcalinidad.

En la tabla 3.3, se muestra la alcalinidad expresada como meq HCO_3/L , de las muestras de agua colectadas en los sitios de muestreo durante las temporadas de secas y lluvias.

Tabla 3.3. Resultados de la alcalinidad de las cinco zonas (promedios de tres muestras del mismo sitio), expresado cómo meq HCO_3/L .

Sitio	Alcalinidad-Secas (meq HCO_3/L)	Alcalinidad-Luvias (meq HCO_3/L)
ZONA A		
Sitio 4.2. Cenote Laguna	4.95	4.15
Sitio 4. Cenote Domo	6.10	6.47
Sitio 3. Cenote Verde Lucero	5.96	4.95
ZONA B		
Sitio 2. Manglar	5.28	4.25
ZONA C		
Sitio 1. Pozo Niños Héroes	4.49	5.81
Sitio 7. Playa 1	7.81	3.34
Sitio 7. Playa 2	10.37	3.60
Sitio 7. Playa 3	3.62	2.90
ZONA D		
Sitio 6. SGD	2.84	2.44
ZONA E		
Sitio 5. Arrecife	2.20	1.88

3.4.1 Resultados de Alcalinidad de los Perfiles de la Zona A (Cenote Verde Lucero) y Zona D (Sitio 8. Laguna Arrecifal).

La alcalinidad en el perfil del Sitio 3. Cenote Verde Lucero (Zona A), presentó un incremento con relación a la profundidad, es decir, que en la muestra superficial a una profundidad de 0.5 metros la alcalinidad fue de 5.34 meq HCO_3/L , mientras que en la muestra más profunda de 7 metros fue

de 6.22 meq HCO₃/L. En los perfiles de la porción marina del transecto incluidos en la Zona D, los valores de alcalinidad oscilaron en los 2 meq HCO₃/L, sin presentar gran variación (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Alcalinidad de perfiles en la Zona A y D.

Sitio	Profundidad (metros)	Alcalinidad (meq HCO₃ /L)
ZONA A		
Sitio 3. Cenote Verde Lucero (M1)	0.5	5.34
Sitio 3. Cenote Verde Lucero (M2)	4.5	5.54
Sitio 3. Cenote Verde Lucero (M3)	7.00	6.22
ZONA D		
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 7, (superficial)	0.15	2.21
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 7, (profundidad)	0.5	2.17
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 8, (superficial)	0.15	2.18
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 8, (profundidad)	1.5	2.16
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 9, (superficial)	0.15	2.08
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 9, (profundidad)	2.5	2.09
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 10, (superficial)	0.15	2.12
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 10, (profundidad)	2.5	2.09

3.5 Resultados de Elementos Mayores.

En las tablas 3.5 y 3.6 se muestran los valores de los iones mayoritarios obtenidos en laboratorio, de las muestras de agua colectadas en los sitios.

En ambas temporadas, los cuerpos de agua subterránea correspondientes a la Zona A (Sitio 4.2. Cenote Laguna y Sitio 4. Cenote Domo), tienen en común que el elemento más abundante es el ion bicarbonato, mientras que el Sitio 3. Cenote Verde Lucero el elemento más abundante es el ion cloro, y también registrando mayor CE. En el caso del Sitio 2. Manglar (Zona B), se detectó que el ion cloro es el más abundante, mientras que en el Sitio 1. Pozo Niños Héroes (Zona C), muestra condiciones similares a los cenotes de ambas temporadas (secas y lluvias).

Para el caso del Sitio 7. Playa (Zona C) en temporada de secas todas las muestras reflejan condiciones diferentes entre ellas, pero es la muestra identificada como Playa 3, que indica condiciones similares con los cenotes, con relación a la proporción de elementos mayoritarios, en esta muestra se detectó una conductividad eléctrica de 702 $\mu\text{S}/\text{cm}$, coincidiendo con el menor valor detectado en las tres muestras de agua de ese sitio. En temporada de lluvias, las muestras de agua del Sitio 7. Playa, muestran una homogeneidad en las concentraciones de sus iones en las tres muestras colectadas, siendo los iones sodio y cloro los elementos más abundantes, denotando condiciones salinas.

En los sitios de la porción marina en la Zona D, donde se encuentra el Sitio 6. SGD y en la Zona E en el Sitio 5. Arrecife, en ambas temporadas se detecta que los iones sodio y cloro son los elementos más abundantes, condiciones más salinas.

Tabla 3.5. Concentraciones en de los cationes y aniones de las muestras de agua colectadas en temporadas de secas y la conductividad eléctrica (CE).

Sitio	Cationes (meq/L)				Aniones (meq/L)				CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻		
ZONA A										
Sitio 4.2	4.73	1.95	1.23	0.04	0.29	1.81	0.00	4.95	640.83	
Cenote Lagua										
Sitio 4.	5.50	2.28	1.88	0.04	0.39	3.69	0.02	6.10	785.43	
Cenote Domo										
Sitio 3.	5.47	2.99	4.20	0.11	0.82	6.33	0.08	5.96	1093.10	
Cenote Verde Lucero										
ZONA B										
Sitio 2.	6.93	13.24	45.99	1.00	0.80	91.59	0.08	5.28	6249.03	
Manglar										
ZONA C										

Sitio	1.	4.69	2.17	2.75	0.14	1.50	4.12	0.14	4.48	1035.00
Pozo Niños Héroes										
Sitio	7.	3.25	5.80	12.40	0.78	4.33	10.17	0.00	7.80	2460.00
Playa 1										
Sitio	7.	2.51	4.10	7.89	0.33	1.38	5.58	0.00	10.30	1532.00
Playa 2										
Sitio	7.	1.55	2.83	2.82	0.28	1.11	1.92	0.00	3.61	702.00
Playa 3										
ZONA D										
Sitio	6.	15.94	91.05	409.43	8.57	86.31	661.87	0.00	2.84	44414.63
SGD										
ZONA E										
Sitio	5.	19.83	105.85	513.89	10.93	108.17	807.74	0.00	2.20	47643.17
Arrecife										

Tabla 3.6. Concentraciones en de los cationes y aniones de las muestras de agua colectadas en temporadas de lluvias y la conductividad eléctrica (CE).

Sitio	Cationes (meq/L)				Aniones (meq/L)				CE (μS/cm)	
	Ca²⁺	Mg²⁺	Na⁺	K⁺	SO₄²⁻	Cl⁻	NO₃⁻	HCO₃⁻		
ZONA A										
Sitio	4.2	3.51	1.20	1.06	0.05	0.21	3.23	0.00	4.15	595.00
Cenote Laguna										
Sitio	4.	5.54	1.70	1.94	0.05	0.39	3.32	0.03	6.46	909.00
Cenote Domo										
Sitio	3.	5.60	2.22	4.29	0.10	0.75	6.94	0.08	4.95	1205.67
Cenote Verde Lucero										

ZONA B										
Sitio	2.	6.91	8.47	38.96	0.82	1.16	66.50	0.00	4.25	6210.00
Manglar										
ZONA C										
Sitio	1.	5.41	2.19	4.75	0.13	2.80	5.65	0.04	5.81	1300.00
Pozo										
Niños										
Héroes										
Sitio	7.	7.62	17.68	106.00	2.31	16.54	205.49	0.00	3.34	13061.56
Playa 1										
Sitio	7.	6.55	23.84	179.04	3.91	36.42	338.63	0.00	3.60	20827.60
Playa 2										
Sitio	7.	4.75	17.46	144.21	3.22	33.67	270.63	0.00	2.90	16688.20
Playa 3										
ZONA D										
Sitio	6.	13.77	96.31	502.20	10.41	108.38	750.26	0.00	2.44	45682.96
SGD										
ZONA E										
Sitio	5.	24.75	127.54	567.17	11.88	115.13	802.66	0.00	1.88	47807.90
Arrecife										

3.5.1 Diagramas de Durov.

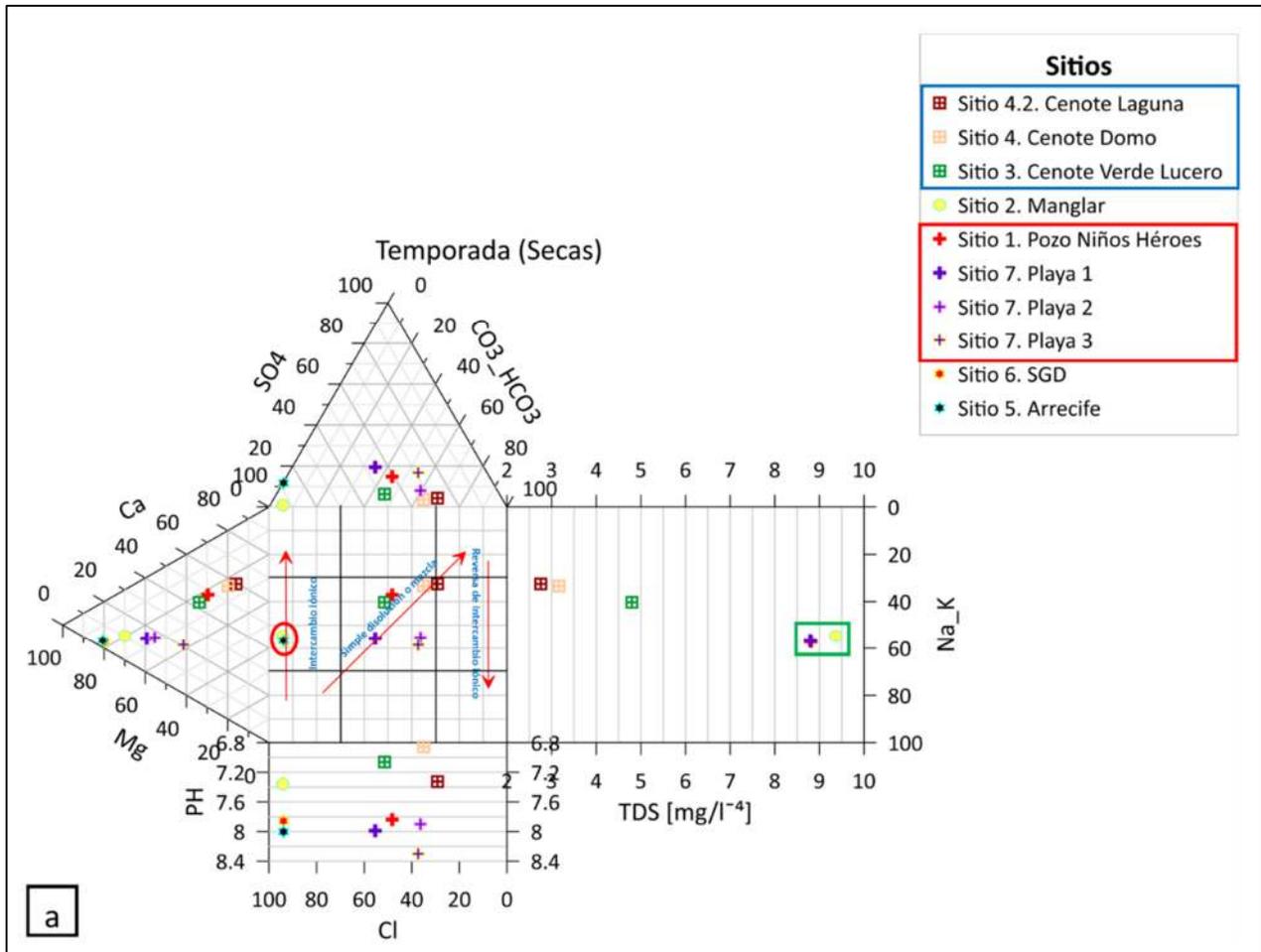
Con los resultados de elementos mayores se construyeron diagramas de Durov, para identificar las proporciones de los cationes y aniones principales en las muestras de agua y los principales procesos hidrogeoquímicos relacionados con el agua subterránea.

Los valores de las concentraciones de los cationes y aniones se ajustaron de tal manera que, la suma representa el 100% y se grafican en los triángulos correspondientes. Se tomaron los promedios de tres de las muestras de cada sitio, a excepción de la playa que se tratan como muestras independientes.

En la temporada de secas (Figura 3.7 a), se pueden identificar que la mayoría de los datos se sitúan en la sección de disolución y mezcla y los sitios Sitio 4.2. Cenote Laguna, Sitio 4. Cenote

Domo y el Sitio 3. Cenote Verde Lucero (incluidos en la Zona A) y el Sitio 1. Pozo Niños Héroes y Sitio 7. Playa (incluidos en la Zona C), están dominados por los iones HCO_3^- y Ca^{2+} , mientras que el Sitio 2. Manglar incluido en la Zona B, el Sitio 6. SGD y Sitio 5. Arrecife, se encuentran iniciando el proceso de cambio de tipo de agua hacia la zona marina.

En la temporada de lluvias (Figura 3.7 b), se identifican el mismo patrón que en la temporada de secas, sin embargo, en este caso, las muestras de agua del Sitio 7. Playa (Zona D), se encuentra en la misma sección que los sitios de la Zona D y E donde se presenta cambio de agua subterránea a agua completamente marina (Sitio 2. Manglar, el Sitio 6. SGD y Sitio 5. Arrecife) respectivamente.



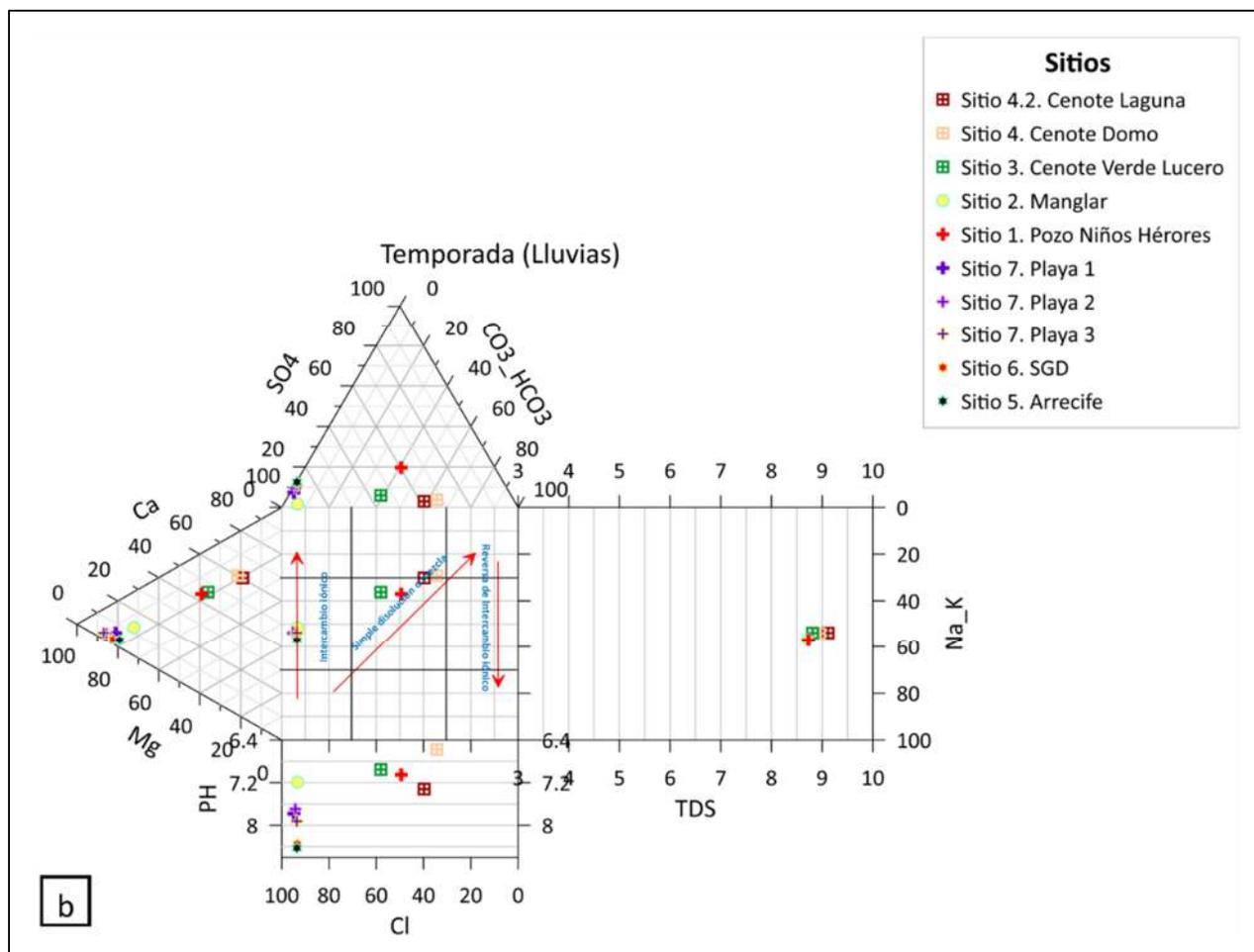


Figura 3.7. Diagramas de Durov a) temporada de secas b) temporada de lluvias.

Además de los diagramas de Durov, se construyeron graficas de dispersión para observar las relaciones de concentraciones de los iones abundantes frente a ion cloruro (Figura 3.8 y 3.9), con el fin de conocer los procesos que resultan de la interacción roca-agua y de mezcla (agua dulce subterránea y agua marina).

Se recurrió a la comparación con el ion cloruro ya que este elemento es muy difícil ser alterado o modificado por intercambio iónico, precipitación, disolución, u otro proceso además que es conservativo en las aguas naturales.

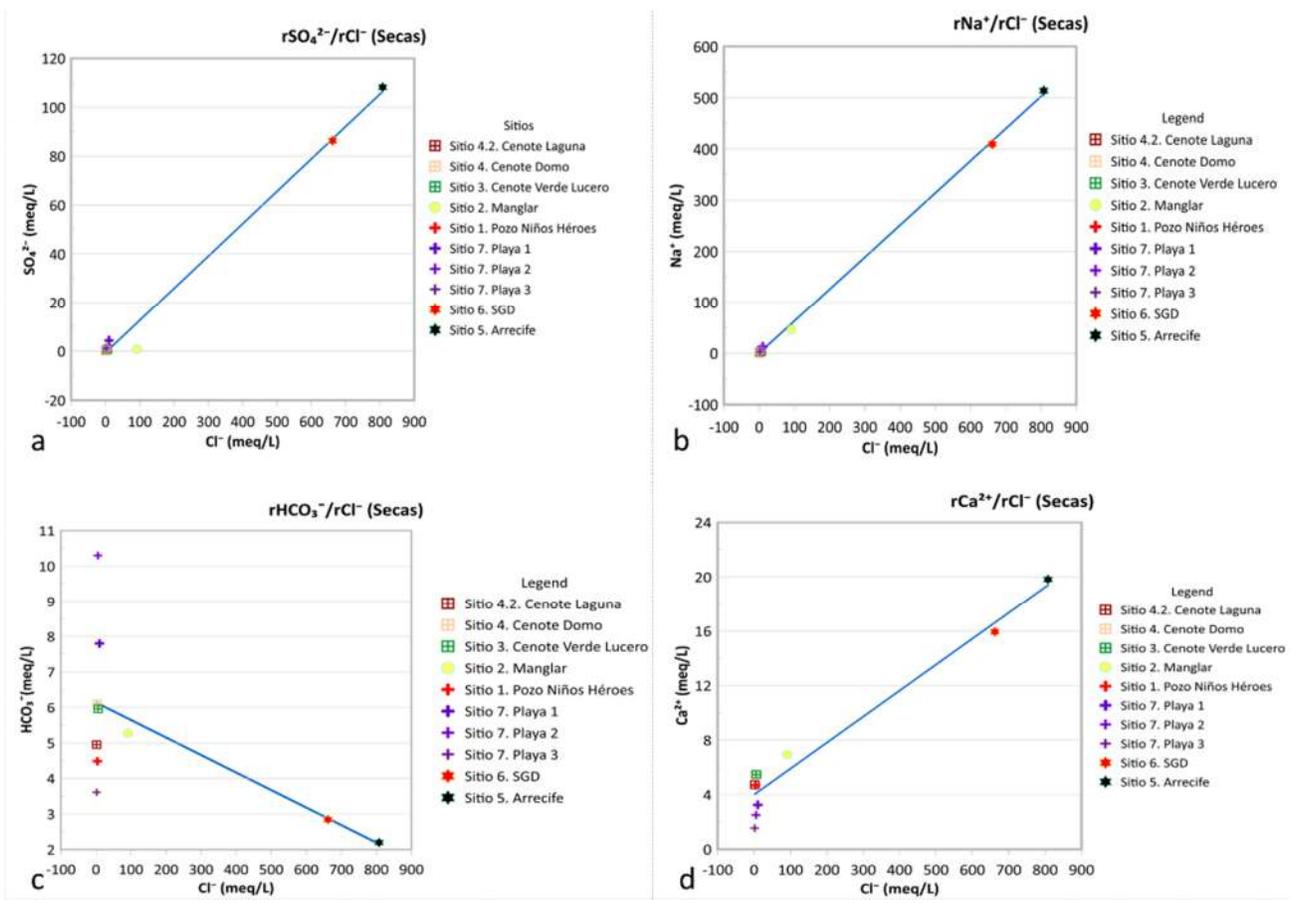


Figura 3.8. Relaciones iónicas temporada de secas

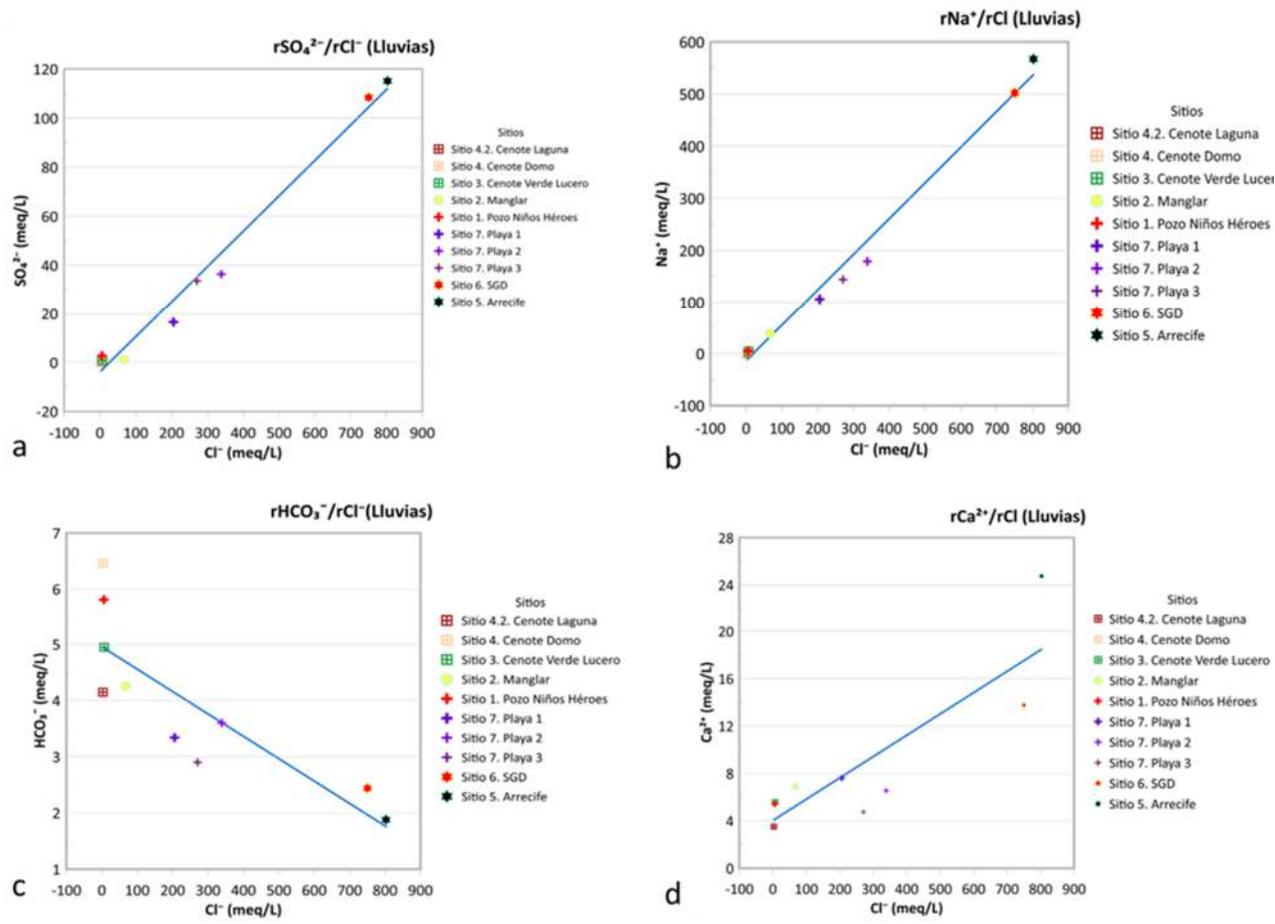


Figura 3.9. Relaciones iónicas temporada de lluvias.

3.5.2 Elementos Mayores en los Perfiles realizados en la Zona A y Zona D.

Los resultados de elementos mayores del perfil de la Zona A (Sitio 3. Cenote Verde Lucero), muestra un incremento con la profundidad en los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} y HCO_3^- identificado con las flechas azules. Mientras que las muestras de los perfiles de la Zona D no muestran cambio alguno con la profundidad, en estos perfiles se observa que los iones dominantes son ion Cl^- , posteriormente el ion Na^+ , (ver Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Concentraciones de los cationes y aniones de las muestras de agua colectadas los Perfiles realizados en la Zona A y Zona D.

Cationes (meq/L)	Aniones (meq/L)
------------------	-----------------

Sitio		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻
ZONA A									
Sitio 3. Cenote Verde Lucero (M1, prof. 0.5m)		5.35	2.17	4.38	0.11	0.92	6.29	0.00	5.34
Sitio 3. Cenote Verde Lucero (M2, prof. 4.5 m)		5.49	2.22	4.35	0.11	0.89	6.57	0.00	5.54
Sitio 3. Cenote Verde Lucero (M3, prof. 7.0 m)		5.82	2.30	4.40	0.10	0.92	6.43	0.00	6.23
ZONA D									
Sitio 8. Punto 7 (Superficial, 0.15m)		12.86	80.03	477.77	9.71	65.40	865.09	0.00	2.08
Sitio 8. Punto 7 (Profundidad, 0.5 m)		13.87	85.85	465.36	9.56	117.27	855.80	0.00	2.10
Sitio 8. Punto 8 (Superficial, 0.15 m)		15.99	94.14	454.17	9.31	113.98	820.43	0.00	2.18
Sitio 8. Punto 8 (Profundidad 1.5 m)		13.09	82.12	471.63	9.68	112.75	818.57	0.00	2.16
Sitio 8. Punto 9 (Superficial 0.15 m)		15.73	93.45	470.50	9.63	115.00	826.29	0.00	2.21
Sitio 8. Punto 9 (Profundidad 2.5 m)		15.92	93.59	463.17	9.42	114.17	825.91	0.00	2.17
Sitio 8. Punto 10 (Superficial 1.15)		15.86	93.38	468.87	9.50	114.75	845.54	0.00	2.12
Sitio 8. Punto 10 (Profundidad 2.5 m)		16.78	91.37	476.33	9.65	119.94	868.00	0.00	2.09

3.6 Resultados de Nutrientes: nitrógeno, sílice y fósforo.

Las concentraciones de los nutrientes se observan en las tablas 3.8 y 3.9, se reportan como el promedio de las tres muestras colectadas en cada sitio de estudio, a excepción del sitio de la playa que se manejó como tres muestras independientes.

Tabla 3.8. Concentraciones de nutrientes en el agua de los sitios de muestreo, temporada de Secas. Mostrado como nitrógeno de cada especie, el fósforo se muestra cómo anión de fosfato.

Sitio	mgNO ₃ ⁻ /L	mgNH ₄ ⁺ /L	mgNO ₂ ⁻ /L	mgP- PO ₄ ³⁻ /L	mgSiO ₂ /L
ZONA A					
Sitio 4.2. Cenote Laguna	<LD	0.04	<LD	<LD	2.19
Sitio 4. Cenote Domo	0.12	0.08	<LD	<LD	3.95
Sitio 3. Cenote Verde Lucero	0.19	0.13	3.51	<LD	2.58
ZONA B					
Sitio 2. Manglar	<LD	0.51	0.13	<LD	3.38
ZONA C					
Sitio 1. Pozo Niños Héroes	0.35	<LD	9.92	<LD	6.92
Sitio 7. Playa 1	<LD	0.65	<LD	<LD	21.62
Sitio 7. Playa 2	<LD	2.40	<LD	0.49	17.40
Sitio 7. Playa 3	<LD	0.04	<LD	0.13	10.70
ZONA D					
Sitio 6. SGD	<LD	0.22	0.51	<LD	0.71
ZONA E					
Sitio 5. Arrecife	<LD	<LD	1.17	<LD	0.32

Nota: <LD= valor por debajo del límite de detección.

Tabla 3.9. Concentraciones de nutrientes en el agua de los sitios de muestreo, temporada de Lluvias. Mostrado como nitrógeno de cada especie, el fósforo se muestra cómo anión de fosfato.

Sitio	mgNO ₃ ⁻ /L	mgNH ₄ ⁺ /L	mgNO ₂ ⁻ /L	mgP- PO ₄ ³⁻ /L	mgSiO ₂ /L
ZONA A					

Sitio 4.2. Cenote Laguna	<LD	0.11	1.22	<LD	3.37
Sitio 4. Cenote Domo	0.11	<LD	2.28	<LD	4.09
Sitio 3. Cenote Verde Lucero	<LD	0.02	5.52	<LD	3.10
ZONA B					
Sitio 2. Manglar	<LD	<LD	2.36	0.01	8.87
ZONA C					
Sitio 1. Pozo Niños Héroes	0.30	<LD	2.19	0.01	9.62
Sitio 7. Playa 1	<LD	0.07	11.75	0.02	7.70
Sitio 7. Playa 2	<LD	0.03	9.61	0.06	7.44
Sitio 7. Playa 3	<LD	0.02	6.23	<LD	5.90
ZONA D					
Sitio 6. SGD	<LD	0.11	2.26	<LD	2.16
ZONA E					
Sitio 5. Arrecife	<LD	<LD	1.23	<LD	1.68

Nota: <LD= valor por debajo del límite de detección.

Nitrógeno

Con los valores obtenidos de las concentraciones de nutrientes como compuestos de nitrógeno en las muestras de agua, se construyeron gráficas que muestran la distribución espacial en el transecto definido, donde se resaltan las zonas de mayor concentración.

La Figura 3.10 a en temporada de secas, muestran que las concentraciones de amonio son bajas y similares en los sitios de la zona de cenotes (A), e incrementan hacia la costa. En la Zona C (Sitio 7. Playa), se detectaron concentraciones en un rango de 0.04 a 2.40 mg NH₄⁺ /L, siendo la muestra denominada como Playa 2, la que reflejó una máxima concentración de Amonio en comparación con las muestras de agua de otros sitios muestreados. En el caso de la porción marina, en la Zona D (Sitio 6. SGD), se detectaron concentraciones de Amonio con cierta variabilidad entre los valores de las tres muestras.

Para el caso de las concentraciones de nitratos, se detectó 3.51 mgNO₃⁻/L en el Sitio 3. Cenote Verde Lucero (Zona A) y en el Sitio 1. Pozo niños héroes (Zona C), la concentración fue de 9.92

mgNO₃⁻/L, siendo en este último sitio donde se detectaron las máximas concentraciones de nitratos y también presencia de nitritos.

En la porción marina, en el Sitio 6. SGD (Zona D) y Sitio 5. Arrecife (Zona E), se detectaron concentraciones de nitrato por debajo de 2 mgNO₃⁻/L, siendo en Sitio 5. Arrecife con 1.17 mgNO₃⁻/L, el de mayor concentración.

En la temporada de lluvias (Figura 3.10 b) disminuyeron las concentraciones de amonio en todos los sitios. También en temporada de lluvias se detectaron concentraciones de nitrato en todos los sitios, en la Zona A (Sitio 4.2. Cenote Laguna, Sitio 4. Cenote Domo y Sitio 3. Cenote Domo), las concentraciones de nitrato se encuentran en un rango de 1.22 a 5.52 mgNO₃⁻/L, manteniendo una distribución progresiva desde el sitio más alejado de la costa (Sitio 4.2 Cenote Domo) hacia el más cercano a la costa (Sitio 3. Cenote Verde Lucero).

Las concentraciones de nitrato disminuyen en las muestras de agua de la Zona B (Sitio 3. Manglar) y el Sitio 1. Pozo Niños Héroes (Zona C). Para posteriormente aumentar en el Sitio 7. Playa, donde se detectaron concentraciones entre 2.00 y 12.00 mgNO₃⁻/L, siendo la muestra denominada como Playa 1, la que reflejó la mayor concentración.

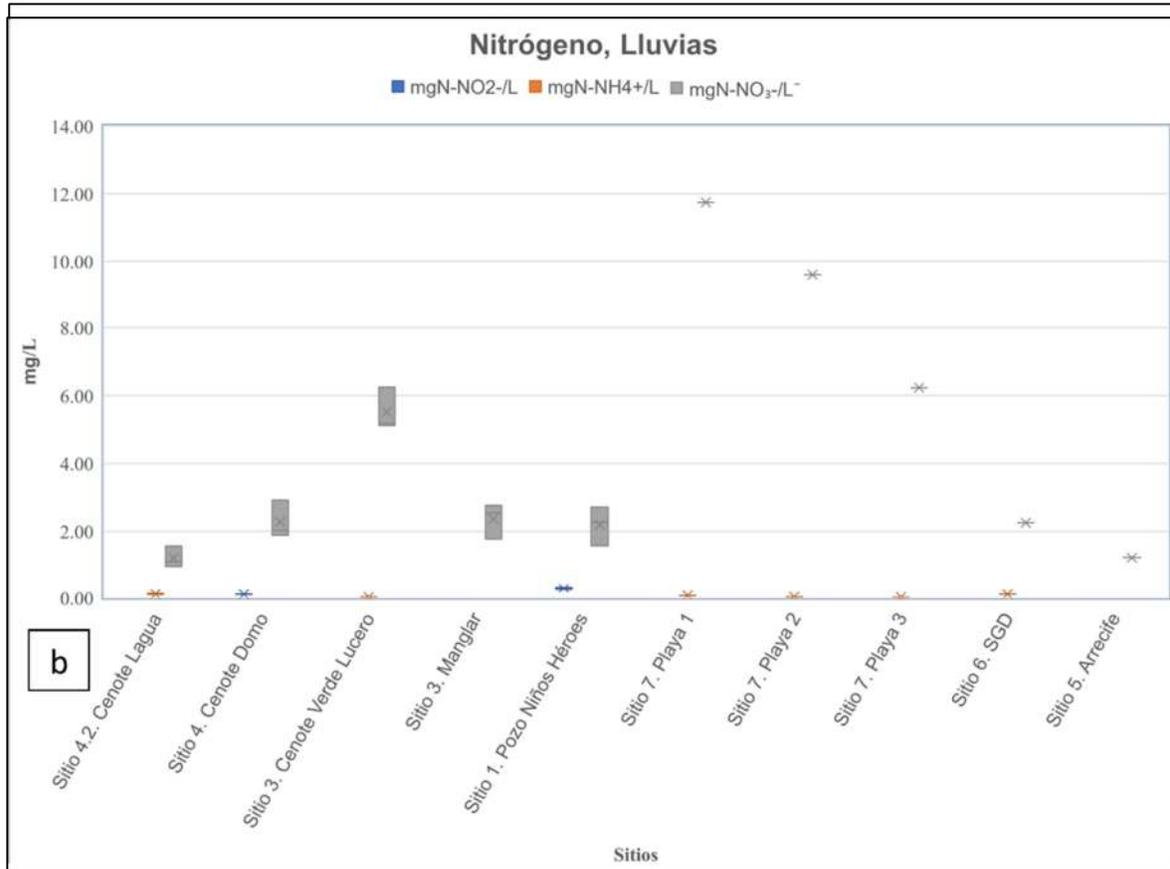


Figura 3.10. Distribución espacial de los compuestos nitrogenados a) temporada de secas, b) temporada de lluvias.

Sílice

Los valores obtenidos de sílice en las muestras de agua reflejan una distribución espacial similar en ambas campañas (Figura 3.11). Sin embargo, las concentraciones de SiO₂ presenta un ligero incremento entre temporadas en la Zona A, B, en sitio denominado (Sitio 1. Pozo Niños Héroes) de la Zona C, así como también la Zona D y E relacionándose con la precipitación ocurrida en junio y agosto del 2021.

Los valores de las muestras de la Zona A y las de las muestras de la Zona B, se obtuvieron tomando en cuenta las concentraciones estándar de bajo rango, mientras que los valores de sílice

de las muestras de agua colectadas en la Zona C (Sitio 1. Pozo Niños Héroes y Sitio 7. Playa) se obtuvieron tomando en cuenta los valores de las concentraciones estándar de alto rango.

En la temporada de secas, las concentraciones de sílice del Sitio 7. Playa se encuentran en un rango de 10.70 a 21.62 mgSiO₂/L, siendo la muestra denominada como Playa 1, la que tiene mayores concentraciones de sílice y la muestra Playa 3, tiene menores concentraciones del sitio. En temporada de lluvias las concentraciones de sílice disminuyeron en el Sitio 7. Playa, coincidiendo con el aumento de la salinidad de las muestras de agua del sitio en esa temporada.

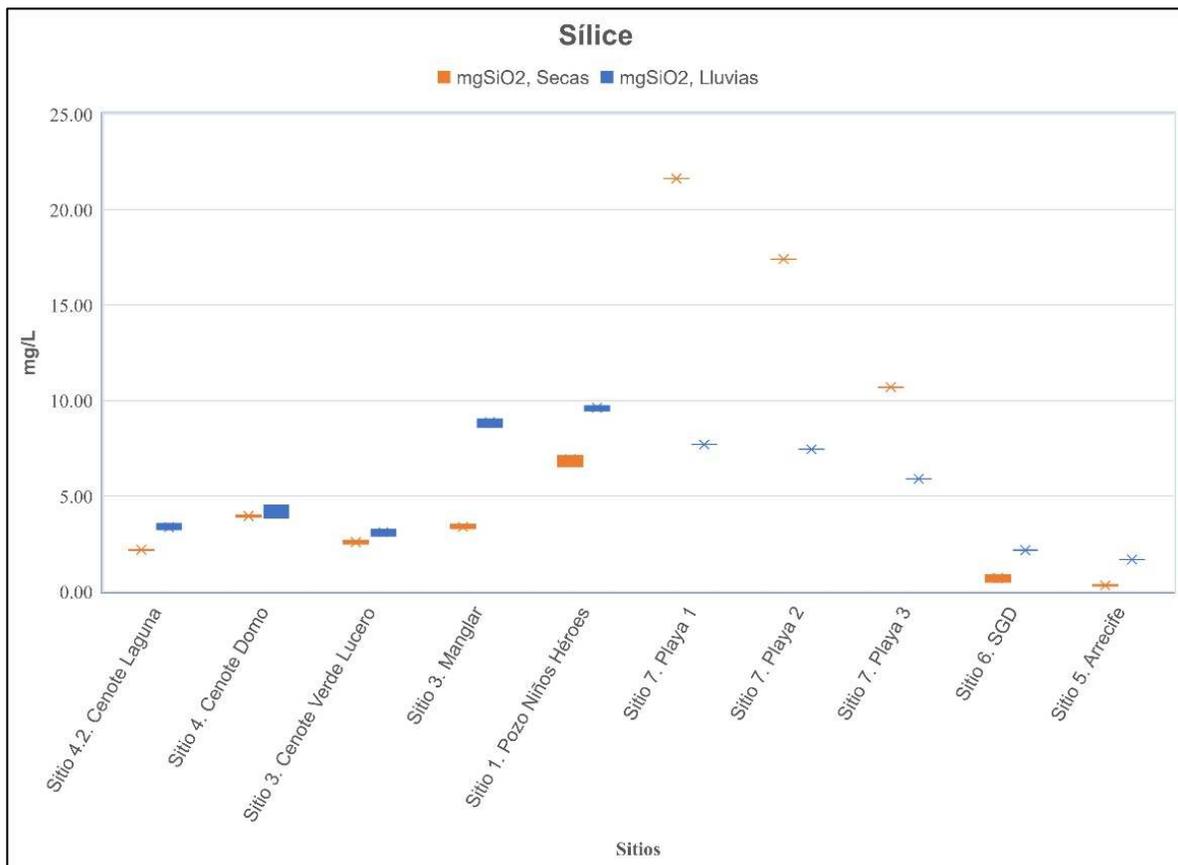


Figura 3.11. Distribución espacial de sílice.

En la porción marina donde se encuentra la Zona D (Sitio 6.SGD) y la Zona E (Sitio 5. Arrecife), las concentraciones estuvieron en un rango de 0.32 a 0.71 mgSiO₂/L en secas y 1.68 a 2.16 mgSiO₂/L, mostrando una disminución de las concentraciones de sílice en ambas temporadas, respecto a las otras zonas. En cuanto a las concentraciones del ion fosfato, se detectaron por

debajo del límite de detección en la mayoría de las muestras de agua colectadas en ambas temporadas, es por ello que no se graficó.

3.7 Resultados de Nutrientes de los Perfiles Zona A (Cenote Verde Lucero) y Zona D (Sitio 8. Laguna Arrecifal).

En las gráficas de la figura 12 se puede observar el comportamiento del Nitrito, Nitrato y Sílice de la Zona A (Perfil de Sitio 3. Cenote Verde Lucero).

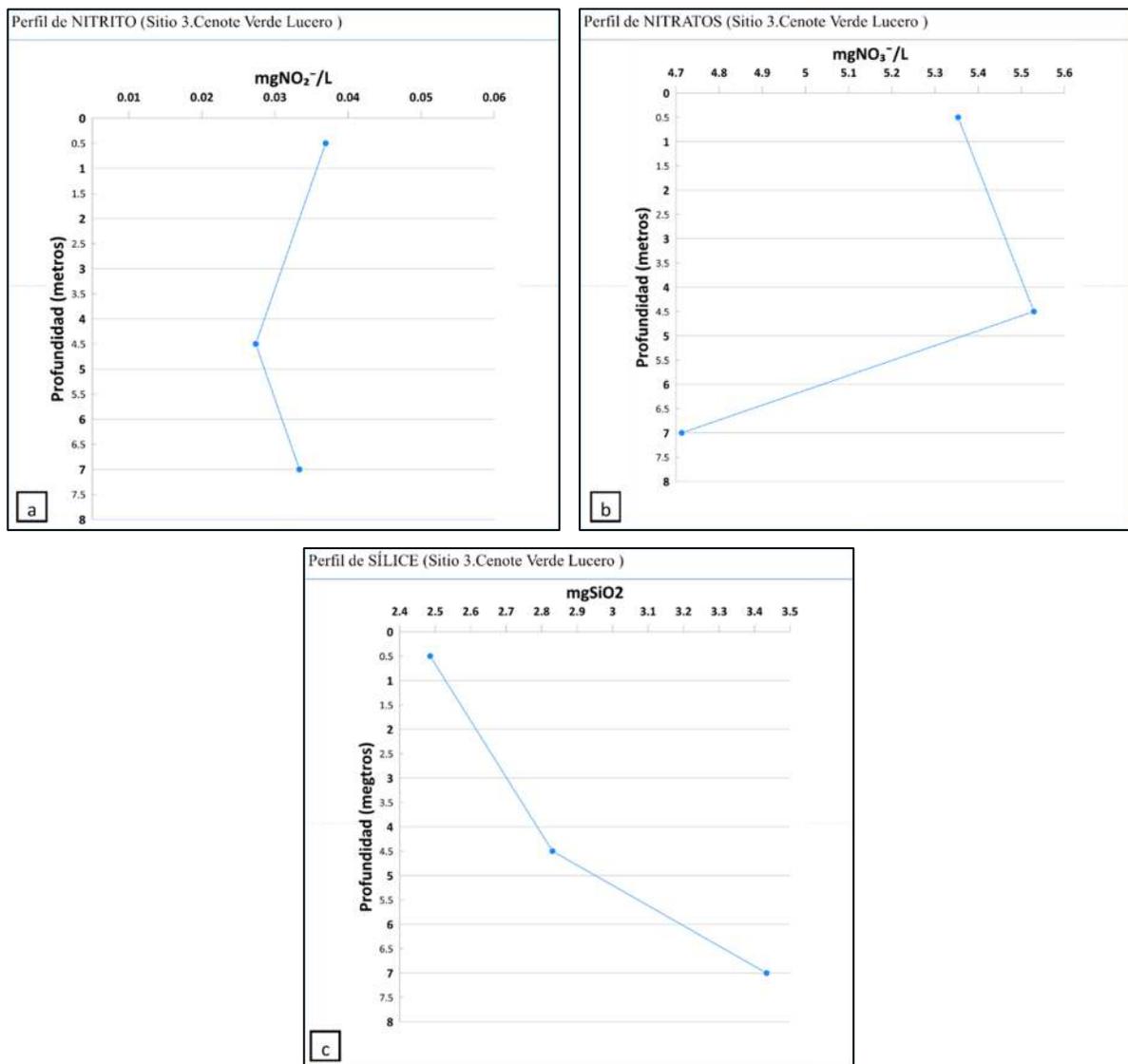


Figura 3.12. Gráficas nutrientes. a) Nitrito, b) Nitrato, c) Sílice. Zona A (Perfil de Sitio 3. Cenote Verde Lucero).

En las muestras de agua de los perfiles realizados en los puntos P7 a P10 del Sitio 8. Laguna Arrecifal, se detectaron concentraciones de Nitrógeno en la fase de Nitratos. Así como concentraciones de Sílice. En el caso del Nitrato (Figura 3.13 a), se observa que las concentraciones aumentaron en el punto P10, el cual se encuentra más alejado de la costa disminuyendo ligeramente con la profundidad. El Sílice (Figura 3.13 b) pasa algo similar, sin embargo, en la profundidad de la muestra se detectan menos concentración de Sílice en los puntos 8 y 9.

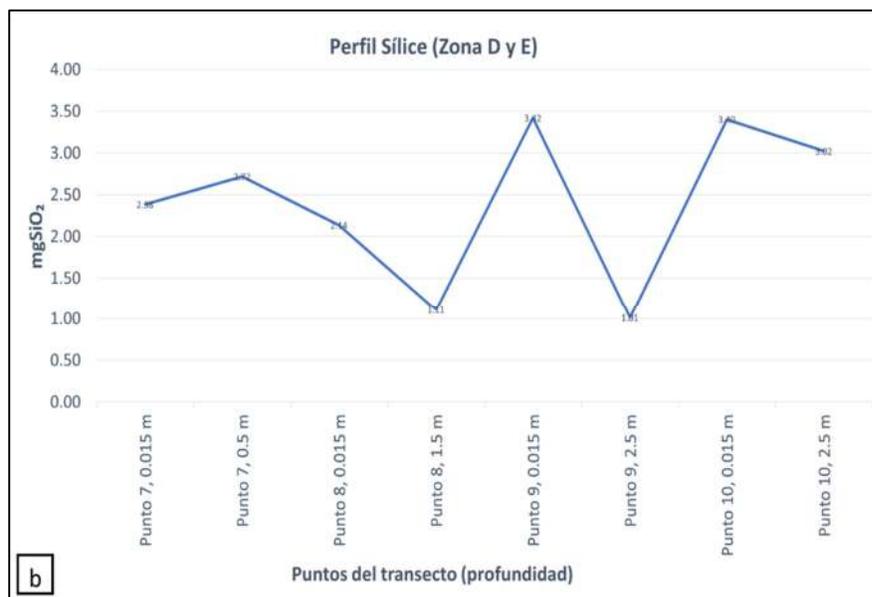
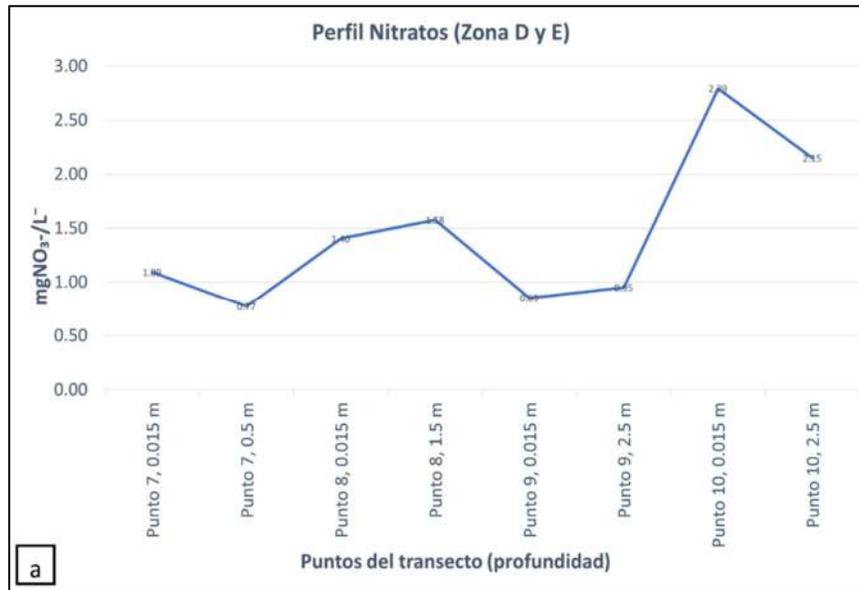


Figura 3.13. Gráficas de Nutrientes en la columna de agua de los perfiles definidos en el Sitio 8. Laguna Arrecifal a) Nitrato y b) Sílice.

3.8 Resultados de indicadores Bacteriológicos.

Los resultados en las tablas 3.10 y 3.11, muestran la actividad microbiana en los sitios de las zonas delimitadas, se reporta presencia de Coliformes Totales y Fecales para muestras de agua dulce y salobre, mientras que Enterococos para muestras de agua salada.

En temporada de secas en las muestras colectadas en la Zona B (Sitio 2. Manglar), se reportan presencia de ambas bacterias, así como en el Sitio 7. Playa y Sitio 6.SGD, ya que las condiciones de salinidad eran variables, sin embargo, en la temporada de secas sólo se reporta Enterococos en las muestras de agua de la Zona D y E, correspondientes a agua marina.

En ambas temporadas la Zona A muestra actividad microbiana de Coliformes Fecales en las muestras de agua, siendo el Sitio 4. Cenote Domo que presenta mayor concentración de bacterias a comparación de los otros dos sitios. La Zona B y C también presenta variabilidad en el número de coliformes detectados entre temporadas, por ejemplo, el Sitio 2. Manglar de la Zona B, en la temporada de secas muestra mayor número de coliformes fecales, mientras que en el Sitio 1. Pozo Niños Héroes muestra mayor concentración de bacterias de coliformes en temporadas de lluvias.

Tabla 3.10. Tabla de indicadores microbiológicos (temporada de Secas). Coliformes y/o enterococos detectados en las muestras de agua de los sitios de muestreo. Se resaltan con asterisco las concentraciones sobresalientes de cada zona.

Sitio	Coliformes Totales (NMP/100 ml)	Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	Enterococos (NMP/100 ml)
ZONA A			
Sitio 4.2. Cenote Laguna	634.55	6.70	NA
Sitio 4. Cenote Domo	1913.80	56.9*	NA

Sitio 3. Cenote Verde Lucero	1475.20	24.82	NA
ZONA B			
Sitio 2. Manglar	2419.60	215.12*	1719.85
ZONA C			
Sitio 1. Pozo Niños Héroes	164.50	1.00	NA
Sitio 7. Playa 1	NA	NA	137.10
Sitio 7. Playa 2	265.75	40.37*	NA
Sitio 7. Playa 3	NA	NA	NA
ZONA D			
Sitio 6. SGD	1227.30	356.85	785.05*
ZONA E			
Sitio 5. Arrecife	NA	NA	2419.60*

Nota: NA (prueba no realizada).

Tabla 3.11. Tabla de indicadores microbiológicos (temporada de Lluvias). Coliformes y/o enterococos detectados en las muestras de agua de los sitios de muestreo. Se resaltan con asterisco las concentraciones sobresalientes de cada zona.

Sitio	Coliformes Totales (NMP/100 ml)	Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	Enterococos (NMP/100 ml)
ZONA A			
Sitio 4.2. Cenote Laguna	>2419.6	121.1	NA
Sitio 4. Cenote Domo	>2419.6	156.5*	NA
Sitio 3. Cenote Verde Lucero	>2419.6	25.6	NA
ZONA B			
Sitio 2. Manglar	>2419.6	59.8*	NA
ZONA C			

Sitio 1. Pozo Niños Héroes	>2419.6	116.9*	NA
Sitio 7. Playa 1	187.575	1.0	NA
Sitio 7. Playa 2	27.55	1.525	NA
Sitio 7. Playa 3	381.62	11.7*	NA
ZONA D			
Sitio 6. SGD	NA	NA	279.65*
ZONA E			
Sitio 5. Arrecife	NA	NA	546.32*

Nota: NA (prueba no realizada).

En temporada de secas, en la Zona D (Sitio 6. SGD) se realizaron las pruebas de análisis de coliformes y enterococos. Los valores de coliformes fecales indican que, aunque es agua salada unidades de coliformes fecales son detectables, los valores de enterococos fueron de 785.05 NMP, mientras que en lluvias disminuyeron a 279.65 NMP. En la Zona E (Sitio 5. Arrecife), se realizó la prueba de Enterolert, observando que los valores de NMP de las muestras de agua del sitio indicando, están por arriba del valor indicado de la prueba.

3.8.1 Resultados bacteriológicos en los Perfiles de la Zona A (Sitio 3. Cenote Verde Lucero) y Zona D (Sitio 8. Perfil Laguna Arrecifal).

De acuerdo con las pruebas bacteriológicas realizadas en las muestras de agua, los valores de NMP (Tabla 3.12), indican que el perfil definido en el Sitio 3. Cenote Verde Lucero (Zona A), detecta el mayor número de unidades de coliformes fecales en la muestra de agua de la columna subsuperficial, para después disminuir con la profundidad.

En el perfil definido en los puntos P7 y P10 del Sitio 8. Laguna Arrecifal, los valores de NMP de enterococos se detectan en todos los puntos y tiende a disminuir en el punto final P10, que se encuentra más alejado de la costa.

Tabla 3.12. Tabla de indicadores microbiológicos (Perfiles). Coliformes y/o enterococos detectados en las muestras de agua de los sitios de muestreo.

Sitio	Profundidad	Coliformes Totales (NMP/100 ml)	Coliformes Fecales (NMP/100 ml)	Enterococos (NMP/100 ml)
ZONA A				
Sitio 3. Cenote Verde Lucero (M1)	0.5 m	1186.6	186.8	NA
Sitio 3. Cenote Verde Lucero (M2)	4.5 m	1028.9	74.44	NA
Sitio 3. Cenote Verde Lucero (M3)	7.00 m	2044.35	43.744	NA
ZONA B				
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 7, (superficial)	0.15 m			1487.7
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 7, (profundidad)	0.5 m			1567.95
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 8, (superficial)	0.15 m			1090.22
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 8, (profundidad)	1.5 m			832.67
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 9, (superficial)	0.15 m			1036.41
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 9, (profundidad)	2.5 m			1108.52
Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 10, (superficial)	0.15 m			199.85

Sitio 8. Laguna arrecifal, Punto 10, (profundidad)	2.5 m	161.65
---	-------	--------

Nota: NA (prueba no realizada).

3.9 Dirección de flujo subterráneo preferencial (Herramientas hidrogeológicas).

Con los cálculos de las cargas hidráulicas de los sitios de muestreo en la porción continental y la Zona Costera (ver Tabla 3.13), se construyó un mapa de isolíneas del área de estudio (Figura 3.14). En el mapa, de manera general se muestra la dirección del flujo preferencial del agua subterránea, dicho flujo se confirma que ocurre desde la porción continental hacia la costa, sin embargo, se observa que en Sitio 3. Cenote Verde Lucero la carga hidráulica tiene un incremento para volver a disminuir en dirección a la costa.

Tabla 3.13. Cálculo de las cargas hidráulicas con el datum obtenido con GPS y el nivel estático (Sitios en la porción continental y la playa).

Sitio	INEGI (BN)	GPSD	Nivel estático	Carga hidráulica con INEGI (BN)	Carga hidráulica GPSD
Sitio 4.2 Cenote Laguna	4.309		0.32	3.989	
Sitio 4. Cenote Domo	6.8205		2.015	4.8055	
Sitio 3. Cenote Verde Lucero	8.259	8.259	3.73	4.529	4.529
Sitio 2. Manglar	1.8591		0.76	1.0991	
Sitio 1. Pozo Niños Héroe	4.0821		3.125	0.9571	
Sitio 7. Playa 1, secas	4.0821		0.76	3.3221	
Sitio 7. Playa 2, secas	4.0821		0.5	3.5821	

Sitio 7. Playa 3, secas	4.0821		0.7	3.3821	
Sitio 7. Playa 1, lluvias	4.0313	2.183	0.72	3.3113	1.463
Sitio 7. Playa 2, lluvias	4.0313	2.183	0.7	3.3313	1.483
Sitio 7. Playa 3, lluvias	4.0313	2.183	0.63	3.4013	1.553

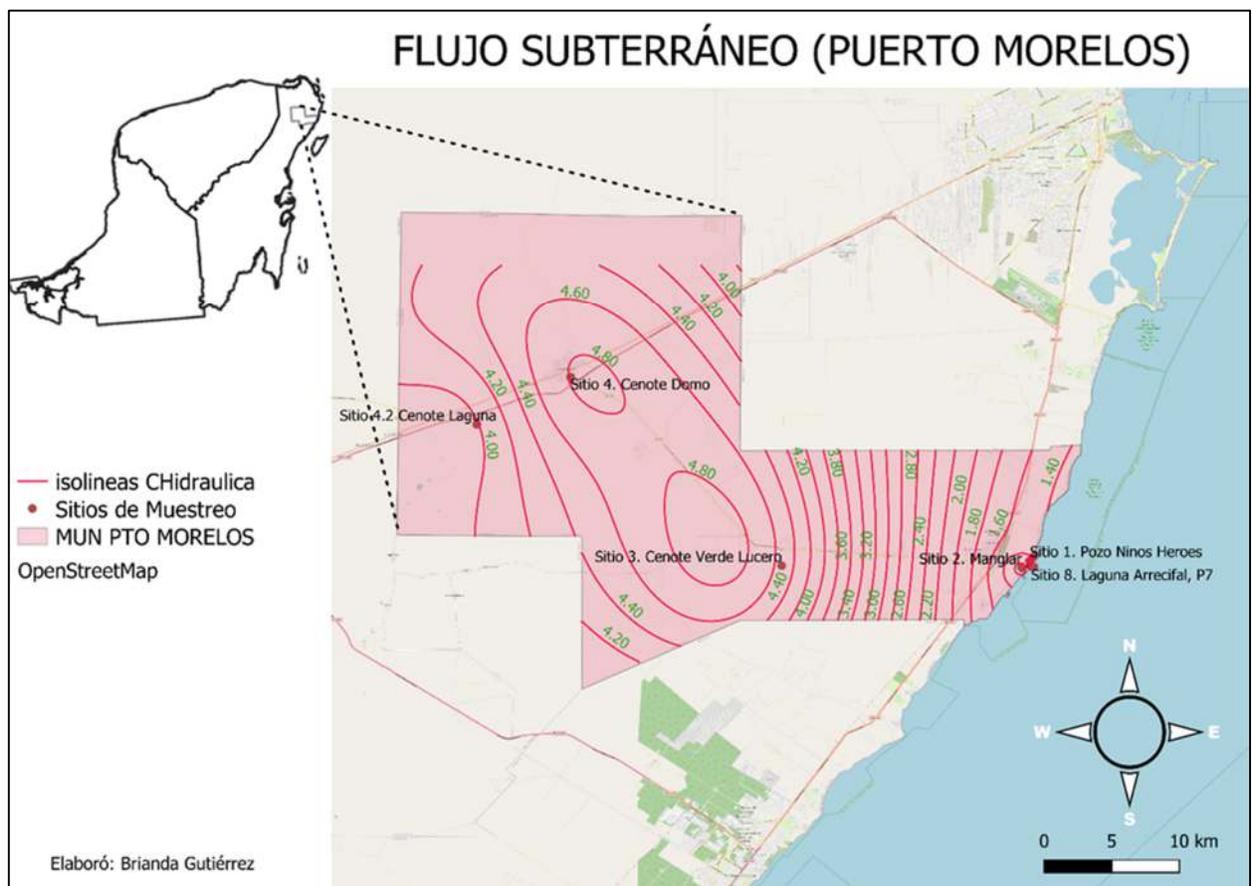


Figura 3.14. Mapa de isolíneas de cargas hidráulicas del área de estudio.

3.10 Análisis de Datos.

En el análisis de conglomerados o Clúster, con 70% de similitud se formó cinco grupos en la temporada de secas y cuatro grupos con 60 % de similitud en temporada de lluvias (Figuras 3.15).

Los modelos de Escalamiento Multidimensional (nMDS) (Figura 3.16) muestran relación de las variables con los sitios estudiados mediante un análisis estadístico multivariado construido para cada temporada.

En la temporada de secas (Figura 3.16 a), se identificaron los siguientes grupos: en el grupo 1, se encuentran el Sitio 4.2 Cenote Laguna, la muestra denominada Playa 3 del Sitio 7. Playa y el Sitio 1. Pozo Niños Héroes. El Grupo 2, se incluyen las muestras denominadas Playa 1 y Playa 2 del Sitio 7. Playa. El grupo 3 está compuesto por el Sitio 4. Cenote Domo y el Sitio 3. Cenote Verde Lucero, mientras que el grupo 4 se compone sólo del Sitio 2. Manglar. Y Finalmente en el grupo 5 se incluye el Sitio 6. SGD y el Sitio 5. Arrecife.

En la temporada de lluvias (Figura 3.16 b), el modelo de Escalamiento Multidimensional (nMDS), define que el Sitio 4.2. Cenote Laguna, Sitio 4. Cenote Domo y Sitio s3. Cenote Verde Lucero se encuentran haciendo un solo grupo denominado Grupo 1, junto con el Sitio 1. Pozo Niños Héroes. El Sitio 2. Manglar, se encuentra únicamente en el grupo 2 y las muestras de agua del Sitio 7. Playa forman el grupo 3 y el grupo 4 está compuesto por los sitios denominados como Sitio 6.SGD y Sitio 5. Arrecife.

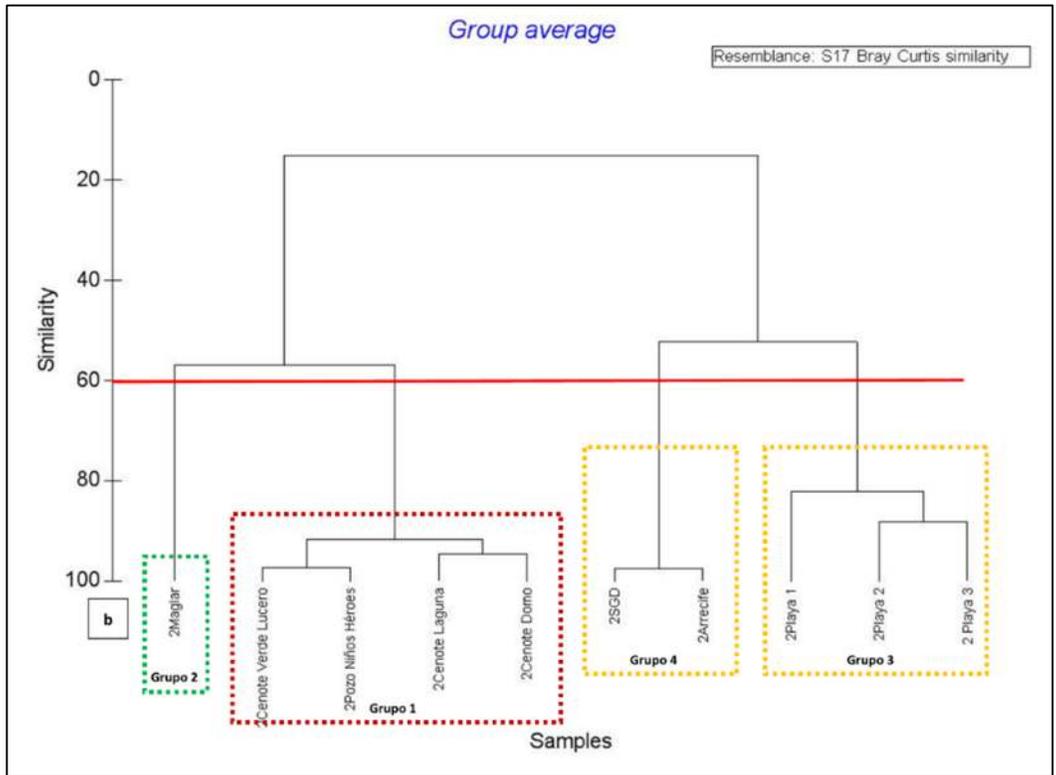
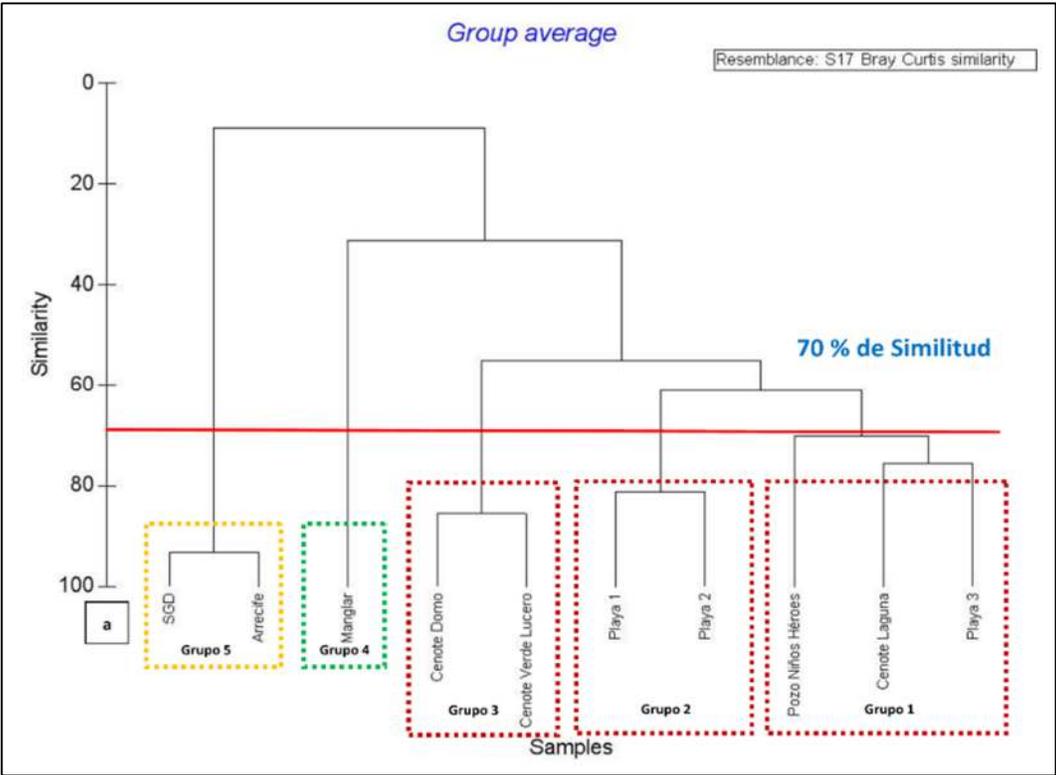


Figura 3.15. Clúster de las muestras colectadas en temporada de secas en los sitios del transecto, línea roja indica "línea fenotípica" marcada para definir los grupos a) secas y b) lluvias.

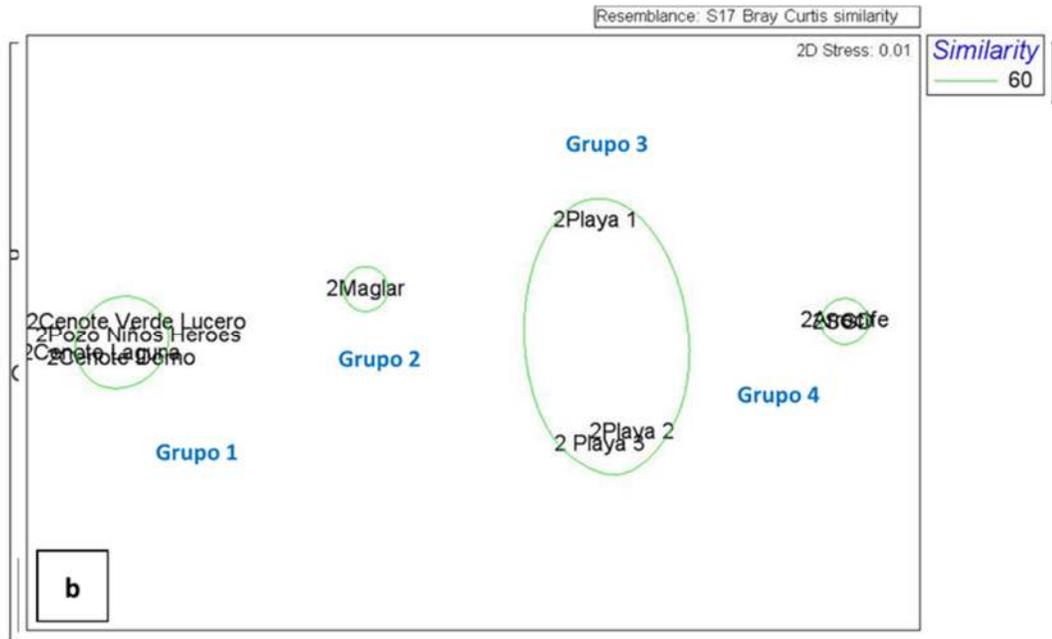


Figura 3.16. Escalado multidimensional no métrico (nMDS) con clústeres superpuestos del análisis de clústeres a un nivel de similitud 70 a) temporada de secas y b) temporada de lluvias.

DISCUSIÓN

Los parámetros fisicoquímicos obtenidos *in situ* como temperatura, pH, conductividad eléctrica y salinidad a una profundidad específica, evidencian una distribución espacial en ambas temporadas (secas y lluvias), ya que los valores cambian a través del gradiente natural desde el continente hacia la costa.

Dicha variabilidad permitió de manera general identificar grupos de agua con características similares. Por ejemplo, los sitios de la zona A, correspondientes a los cenotes que contienen agua subterránea y los sitios en la porción marina que contienen agua de mar. Se logró resaltar las zonas de mezcla de agua subterránea y agua marina como es la descarga subterránea (DAS) de la zona D. Además, se logró enfatizar en las zonas donde se detectan altas descargas de flujos de agua subterránea en zonas continuas al mar, indicando conectividad hidrogeológica, por

ejemplo, en los pozos de la zona C se detectan agua con características similares a los cenotes de la zona A.

Posteriormente, con las concentraciones de los iones de elementos mayores, nutrientes y los resultados de los indicadores bacteriológicos (Coliformes y Enterococos), obtenidos de las muestras de agua colectadas en los diferentes sitios, se construyeron modelos de Escalamiento Multidimensional (nMDS). Los cuales, permitieron detectar agrupaciones de sitios con comportamientos hidrogeoquímicos similares sin importar la distancia que estos presentan de la costa o entre ellos, demostrando puntos de alta interconectividad hidrogeológica.

3.11 Parámetros fisicoquímicos *in situ*.

3.11.1 Temperatura.

La temperatura medida en el agua en ambas temporadas (secas y lluvias) permite identificar diferencias espaciales entre los sitios de la Zona A (Sitio 4.2. Cenote Laguna, Sitio 4. Cenote Domo y el Sitio 3. Cenote Verde Lucero) del resto de los sitios. Estos sitios corresponden a los cenotes o dolinas (agua subterránea) y definen al Grupo I, ya que las temperaturas del agua subterránea tienden a ser más bajas que en otros cuerpos de agua ya que la exposición del sol es poca (Beddows et al., 2007; Hernández-Terrones et al., 2011).

Se detectó un aumento de la temperatura del agua en la temporada de lluvias en los cenotes de la Zona A, con un rango de 28-31.3 °C. Siendo similares a las temperaturas registradas en un estudio realizado por Pérez-Yañez (2020) en tres cenotes de la zona norte de Quintana Roo, que incluye el Sitio 4.2. Cenote Laguna (identificado como “La Victoria”) y Sitio 3. Cenote Verde Lucero (identificado como “Verde Lucero”), donde también en la temporada de lluvias se registró un incremento de la temperatura del agua de los cenotes en un rango de 26.3- 30.6 °C, mientras que en la temporada de secas fue de 24.8-27.9 °C. Del mismo modo en este estudio, se registró que el Sitio 4.2 Cenote Laguna presento el valor más alto de temperatura con respecto a otros cenotes en ambas temporadas.

Custodio y Llamas (1983), relaciona la influencia de las temperaturas del agua subterránea con la temperatura media anual atmosférica de la zona. Sin embargo, en la temporada de secas cuando se realizó el muestreo de este estudio, las temperaturas detectadas en el agua de los

cenotes fueron menores a la temperatura anual, pero similar a la temperatura media del mes de febrero y marzo del mismo año. La temperatura media del aire en los meses de muestreo de mayo a agosto fue de 29.0 °C a 29.4 °C, y la temperatura anual del estado de Quintana Roo fue de 27.6°C, mientras que en los meses de febrero, marzo y abril la temperatura fue 25.5, 26.5 y 28.5 °C, indicando una respuesta atrasada de la temperatura del agua subterránea en relación con la temperatura media del aire.

En la temporada de lluvias (Ver Figura 3.2 a), la temperatura del Sitio 2. Manglar (Zona B) y perteneciente al Grupo II, fue de 32.10°C, mientras que en el Sitio 1. Pozo Niños Héroes (Zona C), también del Grupo II, fue de 29.0°C, siendo mayor en el Sitio 3. Manglar que el Sitio 1. Pozo Niños Héroes. Esto concuerda con lo reportado por Hernández-Terrones et al., (2011), en un estudio realizado en Puerto Morelos, donde indican que la temperatura del manglar fue de 27.5°C, mientras que en pozos de agua fue de 26.8°C. En este estudio durante la temporada de secas ocurre lo contrario ya que, la temperatura del agua del Sitio 2. Manglar fue de 28.9 °C, siendo menor al Sitio 1. Pozo Niños héroes con 29.9°C, sin embargo, coincide con los valores de temperatura de 29.0°C, reportados en la columna de agua en manglares situados en la costa este de la PY por Lagomasino, (2015), muestreados en mayo, pero en el año 2012.

Las temperaturas del Sitio 7. Playa en la zona C fluctuaron entre 28.0°C y 30.8°C en ambas temporadas (secas y lluvias). Aunque fueron similar al estudio de (Hernández-Terrones et al., 2011), en donde obtienen la temperatura del agua en pozos excavados en la playa registra una temperatura promedio de 28.19°C, no muestra mucha relación con la temperatura de los cenotes de la zona A.

La temperatura del agua del Sitio 6. SGD incluido en la Zona D, a una profundidad de 5 metros fue de 28.1 °C en secas, y 29.3 °C en lluvias. Las temperaturas del agua en el sitio 6. SGD fueron ligeramente menores que en el Sitio 5. Arrecife, en donde se registraron una temperatura de 28.6° C en secas y 29.53°C en lluvias. Indicando el efecto de la SGD en la columna de agua en la laguna arrecifal, donde se mezcla dicha SGD con la masa de agua marina, similar a lo demostrado en los estudios realizado por Hernández-Terrones y colaboradores (2011 y 2015), donde las descargas submarinas de agua subterránea tuvieron una temperatura promedio de 26.79°C, mientras que en el agua en la laguna arrecifal fue de 28.72°C.

Estos cambios en la temperatura del agua confirman que las descargas submarinas de agua subterránea son vías de contribuciones de agua subterránea hacia el mar, tal y como muchos autores han demostrado.

3.11.2 pH.

El pH del agua también presenta una variación espacial, ya que el agua subterránea de la Zona A, correspondiente a los cenotes tiene valores de pH menores que el resto de las zonas, y presenta un incremento hacia los sitios cercanos a la costa. Esto, con relación a que el agua subterránea generalmente tiene valores de entre 6.5 a 8, mientras que el agua marina tiende a estar más cercano a 8 (Custodio y Llamas, 1983).

Al igual que el estudio realizado por Pérez-Yañez (2020), se detecta una variación estacional del pH de los sitios denominados Sitio 4.2 Cenote Laguna y Sitio 3. Cenote Verde Lucero. En este estudio el pH tiende a disminuir ligeramente en temporada de lluvias, mientras que en el estudio mencionado fue lo contrario, lo cual puede estar relacionado con los eventos de lluvias al introducirse nuevas características al sistema (Carballo-Parra, 2016).

Por otra parte, en el estudio realizado por Carballo-Parra (2016) reporta valores de pH mayores después de un evento de lluvias en cenotes de Playa del Carmen, sin embargo, en este estudio, en todos los sitios se reportaron valores menores de pH (ligeramente más ácidos) en temporada de lluvias. Se sabe que entre las fuentes de acidez en aguas naturales está el dióxido de carbono proveniente de la atmósfera (Henry y Heinke, 1999), durante este estudio las lluvias intensas que se presentaron en la temporada probablemente provocaron que el pH en el agua disminuyera en respuesta a la composición química del agua de lluvia que precipitó.

Se debe resaltar que, en ambas temporadas (secas y lluvias) el Sitio 4.2 Cenote Laguna de la Zona A, presenta un pH de 7.32 y 7.33 y el Sitio 2. Manglar un pH de 7.36 y 7.19. En estos sitios los valores de pH son similares probablemente porque ambos sitios tienen condiciones correspondientes a los humedales (Cejudo y Herrera-Caamal, 2019).

En el Sitio 1. Pozo Niños Héroe y los pozos de observación en el Sitio 7. Playa (sitios de la Zona C) durante la temporada de secas, presentaron valores de pH entre 7.84 a 8.30, siendo ligeramente mayores que en la temporada de lluvias con valores de 7.05-7.92, probablemente

por la recarga del sistema que se presentó por las precipitaciones ocurridas, quizás cambiando ligeramente las condiciones hidroquímicas del sistema (Ángeles-Portocarrero, 2011).

En la porción marina el Sitio 6. SGD (Zona D), presentó un pH de 7.86 en secas y 8.35 en lluvias, siendo menor que el Sitio 5. Arrecife en la Zona E, con valores de 8.0 en secas y 8.43 en lluvias, similar a lo reportado por Hernández-Terrones et al., (2015), con valores de 6.72 en pH en SGD a diferencia del agua de mar con pH 8.49 promedio.

3.11.3 Conductividad eléctrica (CE).

Se definieron dos grupos de acuerdo a la diferencia espacial de los valores de CE en las muestras de agua, en el primer grupo se ven reflejados los cuerpos de agua con conductividades correspondientes al agua subterránea y salobre con valores entre 595-20,827 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en el segundo grupo se resaltan los cuerpos de agua con condiciones marinas con valores de conductividad entre 47,000-47-900 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Permitiendo definir el alcance de la interconexión en el sistema con la presencia de agua subterránea en sitios muy continuos al mar en la Zona C, entre la zona de manglar identificada como zona B y la laguna arrecifal identificada como zona D.

A grandes rasgos, se observa que, los sitios de la Zona A (Sitio 4.2. Cenote Laguna, Sitio 4. Cenote Domo y el Sitio 3. Cenote Verde Lucero) que definen al Grupo I (Ver Figura 3.1c), los valores fueron menor a los 1,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual coincide con estudios previos realizados por Beddows et al., (2007), en cenotes de la costa este de la PY, a 1-45 km de distancia a la costa, donde se detectaron conductividades de 1,440 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Por otra parte, en el estudio realizado por Pérez-Yañez, (2020), en el cenote correspondiente al Sitio 3. Cenote Verde Lucero, se detectó conductividades eléctricas de 1,060 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en secas y 1,020 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en lluvias. Mientras en el cenote que corresponde al Sitio 4.2 Cenote Laguna se detectaron conductividades eléctricas de 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en secas y 420 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en lluvias, siendo similar a este estudio, donde se observó que el Sitio 4.2 Cenote Laguna presenta conductividades más bajas 640.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en secas y 595.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en lluvias y el Sitio 3. Cenote Verde Lucero con conductividades 1,093.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en secas y 1205.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en lluvias. Lo anterior indica que no se presenta variabilidad estacional, pero si se nota que el sitio más alejado de la costa Sitio 4.2

Cenote Laguna muestra menores conductividades eléctricas que el cenote más cercano Sitio 3. Cenote Verde Lucero.

Los valores de CE se incrementaron en la Zona B, en el Sitio 2. Manglar, donde para ambas temporadas los valores fueron de 6,200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, similar a lo reportado en Hernández-Terrones et al., (2011), donde se detectaron valores promedios de 7,320 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las muestras de agua del manglar. Representando la zona de transición con condiciones de agua salobres hacia a los ecosistemas marinos.

En el Sitio 1. Pozo Niños Héroes de la Zona C, en ambas temporadas se detectaron valores de CE menores 1,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, a diferencia de los reportado en Beddows et al., (2007), donde indican que para pozos a una distancia de 0-1 km de la costa los valores estuvieron por arriba de los 7,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esto confirma que el Sitio 1. Pozo Niños Héroes, tiene contribuciones de agua subterránea con condiciones más parecidas a los cenotes tierra adentro, aunque se encuentre muy cerca de la costa.

En el Sitio 7. Playa incluido también en la Zona C, en la temporada de secas se detectaron valores menores de 2,500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y salinidades menores 1.27 ppt, mostrando condiciones de agua subterránea al igual que en el Sitio 1. Pozo Niños héroes. En un estudio realizado por Null et al., (2014), en muestras de agua obtenidas de pozos excavados en la arena de la playa (metodología similar) en la zona de Puerto Morelos, se reportan valores de salinidad de 4.2 ppt, mientras que en este estudio se detectan salinidades de entre 0.36 a 1.27 ppt demostrando que en este sitio también se presenta conectividad hidrogeológica al percibir agua subterránea en la playa.

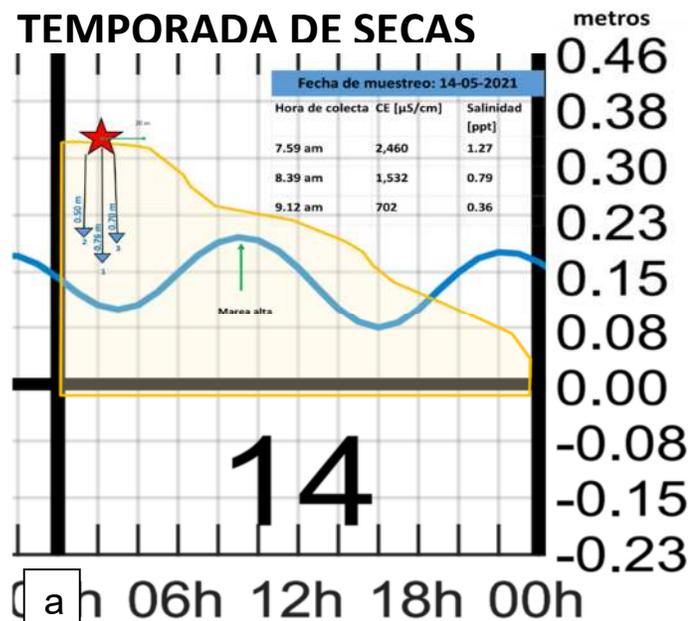
De igual manera, en un estudio similar realizado por Tait et al., (2014), en Mauri Lagoon de la isla de Rarotonga situada en las islas Cook al centro del pacífico, donde las condiciones hidrogeológicas mantienen características de zonas kársticas, en los pozos de observación excavados en la playa se reportó salinidades en un rango de 0.4 – 6.2 ppt, similares en magnitud a los valores obtenidos en este estudio. Una razón puede ser que esta zona está recibiendo flujos de agua subterránea dulce que no se han mezclado con el agua marina o quizás el origen del agua subterránea es de un acuífero superficial diferente al de las descargas submarinas de agua subterránea como se menciona en el estudio de Null et al., (2014).

En las muestras obtenidas en el Sitio 7. Playa, en la temporada de lluvias (Ver Figura 3.2c), se detectó un incremento en la CE con valores entre 13,061.56 y 20,827.60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y una salinidad de 7.51 a 12.43 ppt en las muestras de agua obtenidas de los pozos de observación. Sin embargo, los resultados muestran similitud al estudio de Null et al., (2014), donde las muestras de agua indican una salinidad también de 13.9 ppt, similar a los valores obtenidos en las muestras del agua de este estudio.

Aunque los pozos de observación en la playa se realizaron en dos puntos diferentes entre temporadas, es decir en la temporada de secas se realizaron 730 metros más al norte que en la temporada de lluvias, los valores son confiables, ya que las características hidrogeológicas, morfológicas y las corrientes en la zona son similares en toda la costa (Null et al., 2014), además en el estudio realizado por Nielsen en 1990 con metodología similar, se asume que la arena es homogénea e isotrópica con porosidad y permeabilidad específicas y por las características morfológicas del frente de playa en toda la costa de la zona, se atribuye que el flujo de filtración (seepage) se da de manera horizontal y la presión hidrostática es el elemento que controla la distribución de los flujo a través de toda la costa (Nielsen, 1990).

Si bien la evaluación de mareas y su influencia no fue el objeto de este estudio quisiera presentar la importancia que este proceso pueda tener en la discusión de los resultados obtenidos.

La marea en las horas de muestreo de la temporada de secas fue de 0.15 a 0.23 metros representando una marea alta y en la colecta de la temporada de lluvias se encontraba en 0.00



a 0.15 metros, representando marea baja (Figura 3.17). Lo anterior provocando una diferencia en la magnitud de descarga del acuífero costero ya que los niveles de agua en el gradiente hidráulico pueden modificarse a través de cambios o reordenamientos en las posiciones de las zonas de agua salada, salobre y dulce (Street et al., 2008).

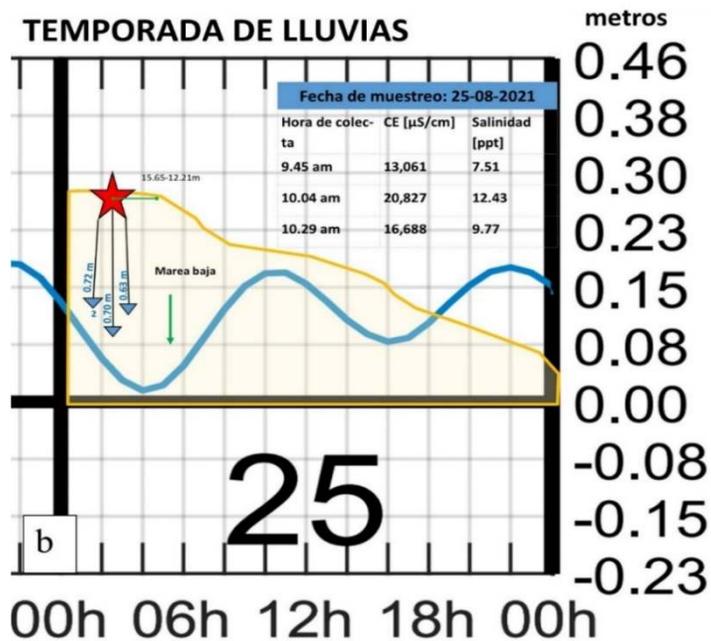


Figura 3.17. Pozos de observación en el Sitio 7. Playa, con nivel de marea, conductividades eléctricas y salinidades a) temporada de secas y b) temporada de lluvias.

Mientras tanto, Lee, (1997) muestra que las tasas de filtración (seepage) son mucho más altas cuando se presentan mareas bajas y para el caso de este estudio se muestran que en marea baja se detectan salinidades más altas (7.51-12.43 ppt) que en marea alta donde se detectan salinidades más bajas (0.36-1.27 ppt), indicando mayor tasa de infiltración (seepage) en marea alta. Esto puede ser en respuesta a distintos fenómenos enlistados a continuación.

1. Mayor índice de filtración (seepage) en marea alta, como reflejo del aumento de flujo hidrológico, como resultado de la disminución de la presión hidrostática (Burnett et al., 2003). Esta tasa de infiltración puede ser calculada directamente a través de medidores de seepage (Lee, 1997) o mediante un balance de masa utilizando trazadores como salinidad o isótopos estables (Null et al., 2014).

2. Menos tasa de infiltración (seepage) en marea baja, debido al fenómeno de bombeo o lavado de marea, es decir que el acuífero costero se recarga con agua de mar en la marea alta y drena en marea baja (Nielsen, 1990; Burnett et al., 2003).
3. La tasa de infiltración puede estar asociada con la inclinación del frente de playa, es decir que el flujo de agua subterránea puede drenar o filtrarse más fácil en una playa más inclinada a gran altura de marea, que drenarse con la marea baja, siendo la misma asimetría que provoque un sesgo en el tiempo de la variación del nivel freático en la playa (Nielsen, 1990).

En un estudio similar realizado en las costas de Kona-Kohala (Hawái), Maui y Moloka'i, la salinidad fue más baja en marea baja que en marea alta, teniendo muy poca relación la marea con la salinidad detectada (Street et al., 2008).

Otro factor que pudo influir en la salinidad detectada en los pozos de observación en la temporada de lluvias y en marea baja, posiblemente fue por efectos del oleaje intenso (Robinson et al., 2014) generado por el huracán Grace del 13-21 agosto 2021, que perturbó las condiciones de mezcla de agua dulce-salada en el acuífero profundo superficial dominando la mezcla con agua marina y aumentando los valores de CE.

Siguiendo el sentido de la evaluación en escala local amplia, en los sitios de la porción marina donde se incluye el Sitio 6. SGD en la Zona D, se detectaron valores de CE de 44,000-45,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo ligeramente menores que los valores detectados en el Sitio 5. Arrecife de la Zona E con 47,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos valores coinciden con los registrados en esta misma zona de Puerto Morelos, en el año de (2011) planteados en el estudio de Hernández-Terrones, donde las conductividades eléctricas detectadas en las SGD (indicados como Submarine Springs) fueron de 40.270 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que en la laguna arrecifal fue de 50,990 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

3.12 Perfiles (Zona D y E).

Por otro lado, los perfiles realizados en la porción marina del transecto (Figura 3.18), incluidos en la Zona D, tienen relación con los valores de los pozos de observación excavados en el Sitio 7. Playa (Zona C), y son la continuidad de la evaluación de los flujos difusos que llegan al mar por el método de filtración (a través de la matriz del medio geológico también denominada seepage).

Se puede observar un aumento paulatino en los valores de temperatura, pH y CE en los perfiles de los puntos P1 al P7, los cuales se encuentran en el frente de playa del Sitio 8. Laguna Arrecifal (Zona D).

De igual manera, en los estudios realizados por Null et al., (2014) en Puerto Morelos, se observa un aumento en los valores de salinidad desde los puntos realizados en pozos excavados con salinidades de entre 4.2- 13.9 ppt en playa hacia costa afuera o mar adentro con salinidades de 37.6 ppt, y también en este caso se puede observar la zona de mezcla en la SGD u ojo de agua cómo fue identificado en el presente estudio, ya que disminuye la salinidad en ese sitio a 27.8 ppt.

A partir del punto denominado P7, donde las profundidades son mayores se observa una diferencia entre los valores de temperatura y pH en la columna de agua profunda y la superficial. Aunque con la conductividad eléctrica no se definan detalladamente tales diferencias, la temperatura y el pH indican posibles cambios en las condiciones de la columna de agua más profunda con la superficial. Sin embargo, se requiere de un muestreo directo mediante medidores de filtración (seepage meters) situados al fondo marino para detectar salidas continuas precisas a través del sedimento evitando mezcla con agua marina.

En el estudio de Zamora et al., (2017), al evaluar la dinámica de flujos de agua subterránea en sedimentos costeros permeables con carstificación, se detectaron filtraciones de agua con salinidades relativamente bajas a través de sedimentos de roca caliza en la zona submareal es decir más lejos de la costa. Por lo que, se asume que las diferencias entre los valores de temperatura y pH detectados en la columna de agua más profunda medida y la superficial pueden comprobar que la contribución de flujos de agua subterránea a través de la infiltración (seepage), también se podrían presentar más allá del frente de playa, hacia las estructuras del arrecife, como son los parches arrecifales e inclusive en el frente arrecifal.

En cuestión a la tasa de infiltración (seepage) relacionado con la marea, en el estudio de Zamora et al., (2017) se detectó un aumento justo antes de la marea alta, mientras que, en este estudio, no se detectó relación alguna con la infiltración el frente de playa con la marea en los perfiles de la porción marina. Indicando que la tasa de infiltración a través de sedimento (seepage) es controlado por las características físicas del medio, por ejemplo, espesor y posiblemente la

pendiente del frente de playa, así como las características hidrodinámicas reguladas por la carga hidráulica (Robinson et al., 2014; Zamora et al., 2017).

Sin embargo, en marea alta se detectaron presencia de flujos discretos continuos en el frente de playa ya que los parámetros fisicoquímicos *in situ* tendían a ser menores en los puntos continuos al frente de playa para posteriormente aumentar ligeramente en el transecto definido hacia los parches arrecifales en la laguna arrecifal.

3.13 Alcalinidad.

La alcalinidad expresada como meq HCO_3 (Ver Tabla 7), presenta una disminución desde la Zona A con valores de 6.10-4.94, hasta el Sitio 1. Pozo Niños Héroes incluido en la Zona C con un valor de 4.49, sin embargo, en el Sitio 7. Playa, en las muestras Playa 1 y Playa 2 tuvieron un aumento significativo de 7.81 y 10.37 respectivamente, coincidiendo con los valores máximos de NH_4^+ /L detectados en esa zona. Esto puede ser ya que el medio tiende a ser un tanto reductor promoviendo las altas concentraciones de Amonio y el incremento de las concentraciones de HCO_3 (Custodio y Llamas, 1963).

En la temporada de lluvias hay una ligera disminución en la alcalinidad y se puede relacionar con la disminución del pH después de las lluvias, debido al aporte de CO_2 promoviendo la disolución de CaCO_3 (Appelo y Postma, 2005).

3.14 Evaluación Hidrogeoquímica.

A grandes rasgos, se observa que la disolución de minerales de rocas carbonatadas es el proceso químico que predomina en las muestras de agua a lo largo del transecto de tierra a la laguna arrecifal.

El análisis realizado con el diagrama Durov identifica que en temporada de secas (Ver Figura 3.7a) existe una distribución espacial de los valores de concentraciones de los elementos mayores, desde la Zona A (Sitio 4.2. Cenote Laguna, Sitio 4. Cenote Domo y el Sitio 3. Cenote Verde Lucero) correspondiente al agua subterránea, la cuál es dominada por los iones Ca^{2+} y HCO_3^- indicando probable disolución de calizas, hacia el proceso de mezcla de agua subterránea dulce con agua marina.

En un estudio realizado por (Lagomasino et al., 2015), que abarca diferentes ecosistemas costeros del estado de Quintana Roo desde el continente hacia la costa con distancias similares, se puede apreciar que el agua presenta una evolución similar desde el continente hacia otro extremo con agua tipo sódica-clorurada, producida por la mezcla de agua subterránea y marina.

La Zona B (Sitio 2. Manglar) se encuentra en la zona de cambio de agua, dentro del proceso de intercambio iónico al ser una zona de transición entre los ecosistemas terrestres a los marinos. Mientras que Zona D, donde se incluye el Sitio 6. SGD y el extremo o zona final en la Zona E (Sitio 5. Arrecife) corresponden al agua marina dominadas por los elementos Na^+ y Cl^- .

Las condiciones específicas que se dan en el manglar (como punto de transición), laguna arrecifal y posteriormente en donde están los parches arrecifales se ven reflejadas en las cargas iónicas predominantes que son conservativas y de origen marino.

Las muestras de agua de la Zona B, no muestra cambio significativo entre temporadas (secas-lluvias), y aunque hay un aumento en las concentraciones del ion Cl^- determinado por las relaciones entre los iones disueltos $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ y $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$, las condiciones que mantienen son más parecidas al agua subterránea similar de la Zona A y C en temporada de secas, ya que en las relaciones se observa aumento del ion cloro pero permanece en el extremo donde se encuentran los sitios correspondientes al agua subterránea en referencia a los iones SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} y HCO_3^- .

Los diagramas de Durov, reflejan no solo las diferencias entre temporadas (Secas y Lluvias), sino que confirma que en temporada de lluvias es donde se da el mayor intercambio iónico por efecto de mezcla de agua de diferente composición química como corresponde a la interconexión en manglar, pero con una carga que identifica su origen marino al estar presente en mayor proporción el ion Cl^- (Stumm y Morgan, 1996, Libes, 2009). Este comportamiento es más notable en la época de lluvias ya que en el diagrama de Durov se observa que los SDT se incrementan y se comportan de manera similar en los sitios de la Zona A y del Sitio 1. Pozo Niños Héroes en la Zona C, manifestando con ello una interconexión del agua subterránea que abarca las condiciones locales (Ver recuadro azul, del diagrama Durov-Lluvias).

En la porción costera, en la Zona C compuesta por el Sitio 1. Pozo Niños Héroes y el Sitio 7. Playa, se observa que en temporada de secas, los valores se encuentran en la zona de mezcla o disolución simple, indicando condiciones similares a las muestras de la Zona A, lo cual es confirmado con las relaciones de $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ y $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ (Figura 3.16). Por otra parte, en la temporada de lluvias únicamente se encuentra en la sección de disolución simple el Sitio 1. Pozo Niños Héroes, mientras que las muestras de agua del Sitio 7. Playa, de la misma Zona C, presenta intercambio iónico hacia el agua marina.

Lo anterior confirma que se presenta un proceso hidrogeoquímico de los flujos locales hacia la costa como ha sido mencionado por diversos autores (Bauer-Gottwein et al., 2011; Gonnee et al., 2014; Null et al., 2014; González-Herrera et al., 2018). Sin embargo, sugiere de acuerdo con las relaciones de temporadas de secas que estas se presentan también en la zona de playa ya que la relación $\text{Ca}^{2+} / \text{Cl}^-$ y $\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+}$ de las mismas muestras del Sitio 7. Playa, en la Zona C en temporada de secas, es menor que la Zona A, indicando que las bajas concentraciones de Ca^{2+} se debe a la respuesta que adquiere el agua con una firma correspondiente al agua subterránea (dulce) circulando a través de medios con condiciones marinas (Custodio y Llamas, 1983).

En el caso de las muestras de agua en temporada de lluvias del Sitio 7. Playa en la Zona C, se observa con las relaciones $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ y $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$, que las condiciones ahí presentes son más de características marinas, sin embargo, las relaciones de $\text{Ca}^{2+} / \text{Cl}^-$ indican que los valores de Ca^{2+} permanecen similares en magnitud a los sitios de la Zona A y que sólo es el Cl^- el que aumenta indicando más influencia de agua marina moviéndose rápido a través del material y que no cambia del todo las características hidrogeoquímicas, esto debido a algún evento de intrusión salina importante como un huracán (Robinson et al., 2014).

En el caso de las Zonas D y E, que se encuentran en la porción marina, su comportamiento químico presenta al igual que la Zona B, proceso de intercambio iónico en dirección al agua marina. En las relaciones de iones $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ y $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ se aprecia que la dominancia es llevada por el ion Cl^- y Na^+ . En un estudio desarrollado en la zona de Puerto Morelos, realizado por González-Herrera et al., (2018) se encuentra tipos de agua dominada por el ion Cl y Na. Esto confirma que, aunque en la Zona D, se ha detectado puntos de alta descarga submarina (Figuras 3.18) las condiciones son diferentes que en la Zona C (Sitio 7. Playa), ya en el Sitio 6. SGD,

domina el agua marina. Ahora bien, los perfiles de la Zona D indican que las condiciones del agua son totalmente marinas dominadas por el ion Cl^- , posteriormente el ion Na^+ .

3.14 Nutrientes.

Nitrógeno.

La distribución de las concentraciones de nitrógeno en todas sus especies presenta variabilidad espacial y temporal en el transecto de este estudio de la zona de cenotes hacia la laguna arrecifal.

En la porción continental, en ambas temporadas las concentraciones de nitrógeno de las muestras de agua de la Zona A (Sitio 4.2. Cenote Laguna, Sitio 4. Cenote Domo y el Sitio 3. Cenote Verde Lucero), fueron relativamente bajas en todas sus especies, siendo el Sitio 3. Cenote Verde Lucero el que presentó mayores concentraciones de nitrógeno en todos sus compuestos respecto a los otros sitios, por ejemplo, las concentraciones de nitratos estuvieron en secas de $3.51 \text{ mgNO}_3^-/\text{L}$ y en lluvias de $5.52 \text{ mgNO}_3^-/\text{L}$.

La zona B (Sitio 2. Manglar) en temporada de secas presentó baja cantidad de nutrientes, pero en temporada de lluvias presentó nitrógeno como compuesto de nitrato. Las bajas cantidades de nitrógeno en las especies de Amonio, Nitrito y Nitrato podría deberse a dos razones: la primera porque el Nitrógeno podría encontrarse en su forma orgánica al tener un reciclaje intenso que mantienen esos ecosistemas, como se muestra en el estudio de Hernández-Terrones et al., (2011) y la segunda es porque el nitrógeno puede eliminarse de la columna de agua rápidamente a través de procesos biológicos, en este caso los procesos biológicos de la vegetación que mantienen los manglares, como ocurre en la investigación realizada por Lagomasino et al., (2015).

En la Zona C, en Sitio 7. Playa, en la temporada de secas, se detectan picos en la concentración de amonio de la muestra denominada Playa 2 con valores de $2.40 \text{ mgNH}_4^+/\text{L}$, pero sin concentraciones detectables de nitrito y nitrato. El origen del amonio del sitio de playa en temporada de secas puede ser autóctono debido al aporte de materia orgánica de fuentes antropogénicas, por ejemplo, la mala disposición de aguas residuales (Ángeles-Portocarrero, 2011; Street et al., 2008, Null et al., 2014).

Respecto al Sitio 1. Pozo Niños Héroes igual en la Zona C, se detectan concentraciones considerables de Nitratos de $9.92 \text{ mgNO}_3^-/\text{L}$ indicando nitrificación del amonio a nitrato al encontrarse en un pozo somero con gran disponibilidad de oxígeno a diferencia del Sitio 7 Playa (Street et al., 2008).

La distribución espacial del amonio y nitrato en la porción costera de este estudio se asemeja a lo reportado por Hernández-Terrones y colaboradores (2011) en puerto Morelos, donde se detectaron mayores concentraciones de ambos compuestos en la zona de la playa a diferencia de los otros sitios estudios del gradiente definido.

En temporada de lluvias las muestras del Sitio 7. Playa, en la Zona C, presentan valores de amonio por debajo de los límites de detección y un aumento en los valores de nitratos en un rango de $6.23 - 11.75 \text{ mgNO}_3^-/\text{L}$, esto puede ser debido a la recarga del acuífero como producto de las precipitaciones acumuladas que introdujo oxígeno al sistema favoreciendo el proceso de nitrificación del amonio existente o quizás trasladó una recarga de nitrógeno de otra zona (Ángeles-Portocarrero, 2011).

La diferencia estacional de las concentraciones de nutrientes especialmente amonio en el agua intersticial coincide con lo reportado por Pérez-Gómez (2019), donde se detecta que las concentraciones de nutrientes en temporada de secas son mayores que en temporada de nortes. Mientras que en la columna de agua de la laguna arrecifal las concentraciones de nitrógeno en sus especies de amonio, nitrito y nitrato fueron mayores en temporada de frentes fríos. Menciona que se debe al efecto de las precipitaciones ya que se facilita un aumento en la SGD del continente aportando nutrientes, además del estrés del viento provoca la re suspensión de sedimentos y agua intersticial.

Respecto a la porción marina, se observa claramente que las concentraciones de nutrientes en los ambientes marinos son mayores en la Zona D, en el Sitio 6. SGD, similar a lo reportado por otros estudios (Hernández-Terrones et al., 2011; Null et al., 2014), a diferencia de la Zona E, Sitio 5. Arrecife. Además, que en temporada de lluvias se observa un incremento en las concentraciones de nitrato en la columna de agua de la porción marina, comprobando lo mencionado por Pérez-Gómez (2019).

Es claro que la zona que presenta mayores condiciones de contaminación con nutrientes como compuestos de nitrógeno en este estudio fue la Zona C, Sitio 7. Playa, tanto en la temporada de secas con altas concentraciones de amonio que indica contaminación directa (González-Herrera et al., 2018) de una fuente local. Así como en la temporada de lluvias con altas concentraciones de nitrato, que al ser la forma más estable del nitrógeno en las aguas subterráneas (Pacheco et al., 2002) se observa una acumulación en esa zona probablemente de otra fuente fungiendo como un reservorio de nutrientes.

Para la temporada de lluvias, en los perfiles definidos en la Zona D, Sitio 8. Laguna Arrecifal, en los puntos separados a 25 metros de distancia de la línea de costa (Ver Figura 3.9) sólo se detectaron concentraciones de nitratos en un rango de 1.0 – 2.5 mg NO₃⁻/L, con un aumento hacia el Sitio 6. SGD, probablemente ya que al ser la forma más oxidada del nitrógeno es la que se detecta en la zona o quizás porque en el agua de mar la forma en que se encuentra el nitrógeno es como nitrógeno orgánico disuelto y en aguas profundas el nitrato (Libes, 2009).

En estudios previos de la zona realizados por Null et al., (2014), se detectaron concentraciones entre 0.24-5.38 mg NO₃⁻/L de nitrato en el frente de playa y de la porción más cerca de 0.03 mg NO₃⁻/L la línea de costa que 0.02 mg NO₃⁻/L en SGD apoyando la idea que las contribuciones de nitrato son mayores en los flujos difusos en el frente de playa que a través de los flujos directos o puntos de alta descarga de las SGD. No es comparable con este estudio ya que las evaluaciones empezaron en los perfiles a 25 metros separadas de la línea de costa, sin embargo, se puede suponer que podría tener el mismo patrón.

Sílice.

En ambas temporadas se observa una distribución espacial progresiva del Sílice desde la Zona A correspondientes a los cuerpos de agua subterránea (Cenotes) hacia la porción costera, donde presenta un aumento en la Zona C con valores de 10.70 - 21.62 mg SiO₂/L en secas y de 2.90-3.34 mg SiO₂/L en lluvias, para después disminuir en las Zonas D y E de la porción marina con agua salina. Las concentraciones de SiO₂/L mantienen una relación con la presencia de agua subterránea ya que mantienen correlación inversa con la salinidad.

En los estudios de Hernández-Terrones et al., (2011) y Null et al., (2014), se observa una distribución espacial similar, sin embargo, la zona de playa no muestra el mismo patrón ya que

las concentraciones de sílice tienden a disminuir con la cercanía al mar y en este estudio las concentraciones aumentan en la zona de playa.

El incremento de las concentraciones de SiO_2/L en el Sitio 7. Playa de la zona C, puede ser una respuesta a que ciertos organismos como las diatomeas absorben el silicio disuelto precipitándolo en forma de sílice amorfo u ópalo en el agua, al morir una porción de la sílice termina en el fondo marino, la porción que se vuelve a disolver se recircula y acumula en el agua de poro en la playa (Van-Cappellen, 2002). Tal disolución depende de factores como el pH y la composición electrolítica del medio acuoso, además de los niveles de saturación del agua con respecto al Sílice controlada por la presión de poro.

En los perfiles de la Zona D, también se detectó sílice (Ver Figura 3.10) en los rangos de 1.01-3.42 mg SiO_2/L , de tal manera que mostraba un aumento progresivo hacia el Sitio 6. SGD con una diferencia entre la muestra superficial y las muestras profundas. Se sabe que las concentraciones de sílice en la columna de agua de ambientes marinos son bajas por acción de las diatomeas y otros organismos (Vicente-Vicente, 2011) por lo que en las muestras colectadas en el Sitio 5. Arrecife se detectaron concentraciones menores de Sílice que en la Zona D.

Bacterias.

Los análisis bacteriológicos indicaron que se presenta una distribución espaciotemporal progresiva hacia la costa, donde en temporada de secas en la Zona A y la Zona C, muestran concentraciones de bacterias similar y menor que la Zona B, mientras que, en la Zona D y E, las concentraciones de bacterias enterococos aumenta. Esto es similar a lo reportado por Hernández-Terrones y colaboradores (2011), donde únicamente se realizó pruebas de coliformes. En la temporada de lluvias mantiene tal relación, con lo reportado por González-Herrera et al., (2018), donde el comportamiento bacteriano aumentó después de la temporada de lluvias, probablemente por arrastre de organismos por efectos de las precipitaciones ocurridas. Caso contrario se presenta en la porción marina donde en las Zonas D y E, ya que disminuye el desarrollo bacteriano.

En los perfiles definidos en la Zona D Sitio 8. Laguna Arrecifal, se observa que las concentraciones de bacterias (enterococos) se presentan en todos los puntos, tanto en las muestras superficiales como en las muestras a profundidad y tienden a disminuir en el punto final P10, que se encuentra más alejado de la costa. Al agregar los Sitios 6. SGD y Sitio 5. Arrecife

(Figura. 3.18) se observa que las concentraciones de enterococos aumentan nuevamente. Esta distribución no muestra relación alguna con el nitrato, pero demuestra en la zona más cercana al frente de playa se detecta mayor número de unidades de estas bacterias.

Ahora bien, en temporada de secas en la playa se realizó la prueba de coliformes fecales en tanto en el Sitio 7. Playa como en el Sitio 6. SGD, encontrando que las mayores concentraciones de bacterias de coliformes se presentan en el Sitio 6. SGD, igual a lo mencionado por el estudio de Hernández-Terrones y colaboradores (2011), entonces la fuente de bacterias detectadas en la laguna arrecifal no se podría sumir que es un efecto trasladado o continuo de las fuentes de agua del Sitio 7. Playa, pero si pudiese ser fuente de la recirculación de bacterias que se encuentran entre el frente de playa y el Sitio de SGD probablemente como consecuencia del sargazo (Hernández-Terrones et al., 2015; García, 2019).

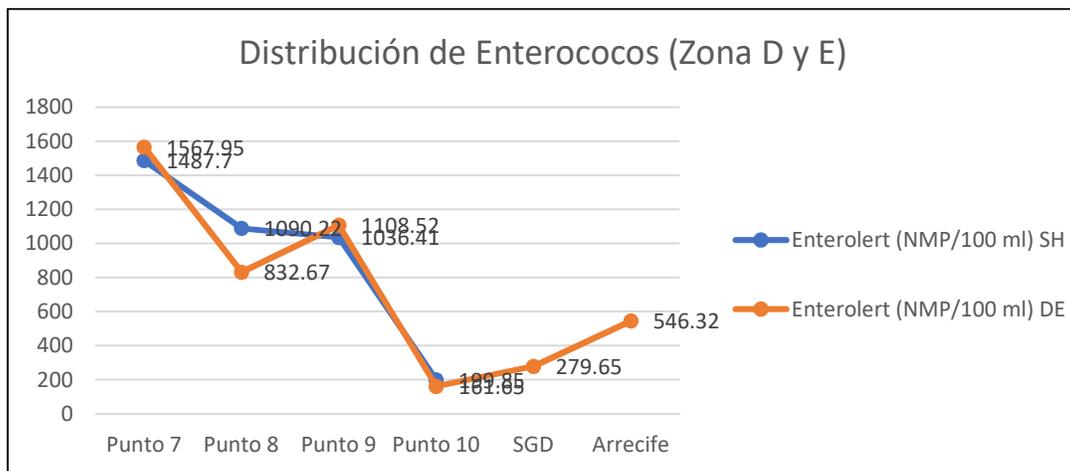


Figura 3.18. Enterococos de la zona D y E (temporada de lluvias).

3.15 Análisis de Datos.

Aplicando técnicas de estadística multivariada se analizaron simultáneamente las variables físicas e hidrogeoquímicas medidas con referencia a todos los sitios, lográndose detectar agrupaciones de sitios que presentan comportamientos hidrogeoquímicos similares sin importar la distancia que estos presentan de la costa o entre ellos, demostrando puntos de alta conectividad hidrogeológica.

En la temporada de secas, se visualiza en el mapa de escalamiento multidimensional obtenidos del análisis de conglomerado con un nivel de similitud de 70% que el grupo 1 se divide en 5 grupos, apreciándose más a detalle que el Sitio 4. Cenote Laguna incluido en la Zona A, el Sitio 1. Pozos Niños Héroes, y la muestra denominada Playa 3, del Sitio 7. Playa incluido en la Zona C, se encuentran dentro del mismo Grupo 1. Lo anterior es similar a lo reportado por el estudio de Carmona-Esquivel (2019), donde se detecta la subdivisión de un grupo en el dendrograma de conglomerados compuesto por un sitio más alejado a la costa (P01-Leona) y uno más cercano de la costa (C05-UCIA). En la temporada de lluvias, se observa que el Sitio 7. Playa se separa del Grupo 1, colocándose en el grupo 3, debido a que se presenta mayor mezcla con el agua marina.

En general las condiciones hidrogeoquímicas indican un comportamiento similar de las condiciones de cada zona ratificando el tipo de expresión de agua subterránea ya que las condiciones de Temperatura y Conductividad eléctrica señalan cambios relacionados a mezclas de agua en la zona D y E y la zona C de acuerdo a la similitud de características evaluadas estadísticamente indican ser la zona donde esta mezcla tiene su punto de interacción hacia la zona D y E como interacción de agua subterránea como se presenta en la siguiente figura.

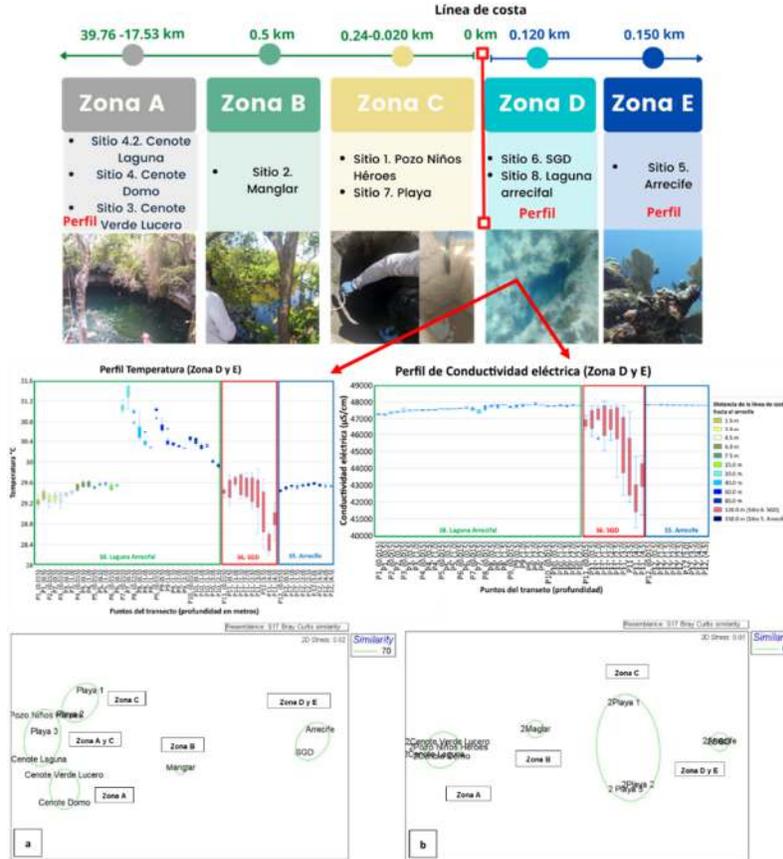


Figura 3.19. Aquí se presentan la importancia de las condiciones hidrogeoquímicas que relacionan las zonas por su similitud respecto a la distancia a costa, así como el comportamiento que se presenta de mezcla en la zona E relacionada a los flujos DAS (SGD) pero muy importante el de la zona C que refleja un comportamiento de mezcla a escala de matriz.

CONCLUSIONES

Con la evaluación de los parámetros fisicoquímicos, se logró identificar diferencias espaciales entre las zonas del transecto más alejada de la costa que corresponden a los cuerpos de agua subterránea (cenotes) en la Zona A del resto de los sitios y los cercanos a costa de las Zonas B, C y D.

La evaluación del comportamiento hidrogeoquímico en cada zona, resalta las zonas donde las contribuciones de agua subterránea completamente dulce se dan a diferencia de los sitios que

presentan mezcla con el agua subterránea y el agua marina, así como las zonas con características químicas propias del agua marina. Se resalta una evidente conectividad hidrogeológica entre la Zona A (Sitio 4.2. Cenote Laguna, Sitio 4. Cenote Domo y el Sitio 3. Cenote Verde Lucero) y la Zona C (Sitio 1. Pozo Niños Héroes y Sitio 7. Playa). Donde se identifica una posible fuente puntual de contaminación al presentar elevadas concentraciones de amonio en temporada de secas y de nitrato en temporada de lluvias específicamente en el Sitio 7. Playa, lo que pone de manifiesto la importancia de interconectividad de flujos de corta distancia.

Mediante los perfiles definidos en la porción marina, se logra identificar que las descargas subterráneas a través de la infiltración que se da en la matriz porosa del frente de playa (seepage), están ocurriendo de manera continua y puede trasladar las condiciones del agua subterránea con características locales hacia la zona de la laguna arrecifal. Es decir, la zona de laguna arrecifal puede estar recibiendo aporte de agua subterránea tanto de la descarga como de la infiltración de poro como lo indican los resultados bacteriológicos dado que la presencia de indicadores fecales está relacionada al desplazamiento de flujos de poca profundidad y alcance (distancia).

Si bien, en este estudio, se confirmó que el flujo subterráneo va de la zona más lejana en continente hacia la costa (hacia el arrecife) en expresiones de DAS como ya ha sido mencionado por otros autores. Se puede decir que los resultados del comportamiento hidrogeoquímico detectados en la columna de agua en cenotes y pozos comparada con la detectada en las columnas de agua de la laguna arrecifal, en especial en la zona de recale, indica la interacción de la contribución de flujos de agua subterránea a través de la infiltración (seepage), cuya influencia también se podrían presentar más allá del frente de playa hacia la laguna arrecifal.

Esto indica la importancia del flujo local a nivel de poros de la matriz geológica en costa presenta una interacción que contribuye a las condiciones de variación en la costa a una escala diferente a las DAS y cuya temporalidad e influencia en el balance de nutrientes de la costa aún falta por ser estudiada.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta-González, G. (2013). Predicción espacial de áreas estables en arrecifes costeros del Caribe Mexicano: Factor Biodiversidad. Tesis de Doctorado, CINVESTAV, México.
- Álvarez Filip, L., Bonilla Moheno, M. (2007). Arrecifes coralinos, selvas tropicales y huracanes. Ciencias 87, 14-17. Obtenido de <https://www.revistacienciasunam.com/>
- Alves d'Acampora, B. H. (2018). La conectividad ecológica en los paisajes de manglares de la región metropolitana de Florianópolis, costa Sur de Brasil. Tesis de Doctorado, E.T.S. Arquitectura (UPM), Urbanística y Ordenación del Territorio, Madrid.

- Ángeles-Portocarrero, R. (2011). Interacción Agua Superficial-Acuífero Libre y el Contenido de Nutrientes en la Cuenca del Arroyo El Tejar, Departamento Monteros, Provincia de Tucumán. Tesis de Maestría (Ingeniería Ambiental), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Tucumán, Tucumán – Argentina.
- Anthonisen, A. C., Loehr, R. C., Prakasam, T. B., Srinath, E. G. (1976). Inhibition of Nitrification by Ammonia and Nitrous Acid. *J. Water Pollut. Control Fed* 48 (5), 835-852. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/25038971>
- Appelo, C., Postma, D. (2005). *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Rotterdam: Balkema.
- Ardisson, P.-L., M. A. May-Kú, M. T.-D., Arellano-Guillermo, A. (2011). El Sistema Arrecifal Mesoamericano-México: consideraciones para su designación como Zona Marítima Especialmente Sensible. *Hidrobiológica*, 21(3), 261-280.
- Arias-González, J.E., Rivera-Sosa, A., Zaldívar-Rae, J., Alva-Basurto, C., Cortés-Useche, C. (2016). The Animal Forest and Its Socio-ecological Connections to Land and Coastal Ecosystems. In: Rossi, S., Bramanti, L., Gori, A., Orejas Saco del Valle, C. (eds) *Mar Animal For*, Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-17001-5_33-1.
- Arriaga-Cabrera, L., Aguilar-Sierra, V., Alcocer, J. (2000). Aguas continentales y diversidad biológica de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).
- Aurell Cardona, M., Bádenas Lago, B. (1999). Arrecifes de coral y concentración de dióxido de carbono, un ejemplo en la didáctica sobre Cambio Climático. *Enseñanza de las ciencias de la tierra: AEPECTEC*, 7(1), 21-28.
- Baguette, M., Van Dyck, H. (2007). Landscape connectivity and animal behavior: Functional grain as a key determinant for dispersal. *Landscape Ecol*, 22(8), 1117–1129.
- Barba, E., Palacios, J. (1998). Fauna acuática cavernícola de la Península de Yucatán. *Mundos Subterráneos*, 31-43.
- Bárbara, A. d. (2018). La conectividad ecológica en los paisajes de manglares de la región metropolitana de Florianópolis, costa Sur de Brasil. Tesis de Doctorado, E.T.S. Arquitectura UPM. MADRID: del Instituto Politécnico Nacional doi: <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.52182>
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B., Charvet, G., Marín, L., Rebolledo - Vieyra, M., Merediz Alonso, G. (2011). The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeol J*, 19. 507-524. doi:DOI 10.1007/s10040-010-0699-5

- Bautista, F., Palacio, G. (2012). Península de Yucatán. En Páez-Bistraín, R., Carmona-Jiménez, M., Delgado-Carranza, C., Cantarell, W., Tello, H, (Edits.), Geografía de suelos de México, pp 355-406
- Beddows, P. (2004). Groundwater Hydrology of a Coastal Conduit Carbonate Aquifer: Caribbean Coast of the Yucatán Peninsula, México, PhD Thesis. KIP Articles. 2309. https://digitalcommons.usf.edu/kip_articles/2309
- Beddows, P., Smart, P., Whitaker, F., Smith, S. (2007). Decoupled fresh-saline groundwater circulation of a coastal carbonate aquifer: Spatial patterns of temperature and specific electrical conductivity. *J Hydrol (Amst)*, 18-32. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.08.013
- Bélisle, M. (2005). Measuring Landscape Connectivity: The Challenge of Behavioral Landscape Ecology. *Ecology (USA)*, 86(8), 1988-1995.
- Black, P. E. (1997). Watershed Functions. *J Am Water Resour Assoc*, 33(1), 1-11. doi:10.1111/j.1752-1688.1997.tb04077.x
- Boyd, C. E. (2015). *Water Quality: An Introduction*. Auburn, AL, USA: Springer. doi:10.1007/978-3-319-17446-4
- Brauman, K. A., Daily, G. C., Duarte, T. K., Mooney, H. A. (2007, November 21). The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services. *Annu Rev Environ Resour*, 32, 67–98. doi: 10.1146/annurev.energy.32.031306.102758
- Burel, F., Baudry, J. (2003). *Landscape Ecology Concepts, Methods, and Applications*. Enfield, New Hampshire 03748, United States of America.: Science Publishers, Inc.
- Burke, L., Maidens, J. (2004). *Reef at Risk in the Caribbean*. Washington, DC: World Resources Institute.
- Cabadas-Baez, H., Solleiro-Rebolledo, E., Sedov, S., Pi-Puig, T., Alcala, J. (2010). The Complex Genesis of Red Soils in Peninsula de Yucatan, Mexico: Mineralogical, Micromorphological and Geochemical Proxies. *Eurasian J. Soil Sci*, 43(13), 1439-1457. doi:10.1134/S1064229310130041
- Cabello, C. B., Hervás Ramírez, M. E. (2001). Contaminación de las aguas por nitratos y efectos sobre la salud. *Consejería de Salud*, pp 87
- Cabrera, M., Custodio, E. (2013). Métodos de estudio hidrogeológicos e hidrogeoquímicos. En J. C. Cerezal, & J. C. Cerezal (Ed.), *Hidrología y recursos hídricos en islas y terrenos volcánicos. Métodos, Técnicas y Experiencias en las Islas Canarias*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Montes, pp 93-134

- Carabias-Lillo, J., Provencio, E., Maza-Elvira, J., Gutiérrez-Carbonell, D., Gómez-Cruz, M. (2000). Programa de Manejo del Área Natural Protegida con el carácter de Parque. México, D.F.: Instituto Nacional de Ecología.
- Carballo-Parra, R. M. (2016). Hidrogeoquímica y comportamientos de flujos de agua subterránea en zonas de manglar de la Riviera Maya. Tesis de Maestría, CICY, México.
- Carmona, A. D. (2019). Caracterización Geoquímica del Agua Subterránea en el Este de Quintana Roo, México. Tesis de Maestría, CICY, México.
- Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Luna-González, L., Gámez-González, F. J. (2005). Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. *RMCG*, 22(1), 1-18. Retrieved febrero 2, 2022, from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742005000100001
- Carrillo-Rivera, J. (2000). Application of the groundwater-balance equation to indicate inter basin and vertical flow in two semi-arid drainage basins, Mexico. *Hydrogeol J*, 8(5), 503-520. doi: DOI:10.1007/s100400000093
- Castro, E., Cardona, A., Rivera, J. (1999). Hidrogeoquímica en el acuífero calcáreo de Mérida, Yucatán: elementos traza. *Rev. TyCA*, 14, 19-28.
- Cejudo E., Acosta-González G., Ortega-Camacho D., Perera-Burgos J.A., Leal-Bautista R.M. (2022). Caracterización Hidroquímica y Geofísica de una Descarga de Agua Subterránea en Quintana Roo, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 9(2): e3211. DOI: 10.19136/era. a9n2.3211
- CONAGUA, (2015). Programa Hídrico Regional 2014-2018 de la región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán. México.
- CONAGUA, (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero península de Yucatán (3105), Estado de Yucatán. Ciudad de México. Subdirección General Técnica Gerencia de Aguas Subterráneas.
- CONANP y PNUD México, (2020). Resumen Ejecutivo del Programa de Adaptación al Cambio Climático del Corredor Isla Mujeres-Puerto Morelos.
- Custodio, E., Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea (2ª)*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.
- Drever, J. I. (1982). *The Geochemistry of Natural Waters*. Universidad de Michigan: Prentice-Hall.
- Eamus, D., Froend, R. H. (2006). Groundwater-Dependent Ecosystems: The where, what and why of GDEs. *Aust J Bot*, 54(2), 91-96. doi:10.1071/BT06029

- Echeverri, G. E. (2012). Aspectos teóricos sobre el fenómeno de contaminación de aguas subterráneas. *Rev. EAFIT*, 34(111), 61-75. Recuperado el 31 de enero de 2022, de <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1105>
- Elizondo, C., Protegidas, C., Morelos, M. (2012). Estudio Previo Justificativo, propuesta de creación del Área de Protección de Flora y Fauna. "Humedales de Puerto Morelos". doi:10.13140/RG.2.1.3639.0006
- Espinosa, I., Aguilar, V., Cruz, I., Martínez, M., Ressler, R. (2020). Reporte final del proyecto específico: "Investigación sobre propuestas metodológicas de conectividad del paisaje para ecosistemas costeros y su implementación en un sitio piloto". doi:10.13140/RG.2.2.11114.34245
- Espinosa, L., Cerón, M., Sulub, Y. A. (1998). Limestone rocks of the Yucatan peninsula. Description of the lithology and physical properties based on the results of exploration, investigation, and laboratory tests. *Int J Rock Mech Min Sci* (1997), 35(4-5), 410-411.
- Estrada-Medina, H., Jiménez-Osornio, J. J., Álvarez-Rivera, O., Barrientos-Medina, R. C. (2019). El karst de Yucatán: su origen, morfología y biología. *SciELO*, 29(e2292). doi:10.15174.au.2019.2292
- Eugercios Silva, A. R. (2013). Interacciones acuífero-lago y biogeoquímica del nitrógeno en ambientes kársticos. Tesis de Doctorado, Madrid.
- Fagundo-Castillo, J., Magliano, M., Carrillo-Rivera, J., González-Hernández, P. (2014). Characterization of Groundwater Flows According to Salinity. *Rev. TyCA*, 5(3), 63-80.
- Falcón, L.I., Yáñez-Montalvo, A. F., Gaona, O., Hernández-Arana, H.A. (2020). Laguna Bacalar, Quintana Roo: hogar del arrecife bacteriano de agua dulce más grande del mundo. *Metabólica, Revista de Crítica Ambiental*. 1 (2). capturaprevia100-105.
- Freeman, M., Pringle, C., Jackson, C. (2007). Hydrologic Connectivity and the Contribution of Stream Headwaters to Ecological Integrity at Regional Scales, *J Am Water Resour Assoc*, 43, 5-14. doi: doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007. 00002.x
- Freeze, R. A., Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall.
- Frost, S. H., Harbour, J. I., Beach, D. K., Realini, M. J., Harris, P. M. (1983). Oligocene reef tract development, southwestern Puerto Rico. *Sedimenta IX*. University of Miami, 144.
- Gondwe, B., Hong, S.-H., Shimon, W., Bauer-Gottwein, P. (2010). Hydrologic Dynamics of the Ground-Water-Dependent Sian Ka'an Wetlands, Mexico, Derived from InSAR and SAR Data. *Wetlands*, 30(1), 1-13. doi:10.1007/s13157-009-0016-z

- Gonneea, M. E., Charette, M. A., Liu, Q., Herrera-Silveira, J., Morales-Ojeda, S. M. (2014). Trace element geochemistry of groundwater in a karst subterranean estuary (Yucatan Peninsula, Mexico). *Geochim Cosmochim Acta*. 132, 31-49. doi: 10.1016/j.gca.2014.01.037
- González-Herrera, R. A., Sánchez y Pinto, I. A., Cervantes-Martínez, A., Osorio-Rodríguez, J. H. (2018). Calidad de agua en el acuífero de Puerto Morelos, Quintana Roo, México. *Rev. RTP*. 69-89.
- Hall, F. (1936). Physical and chemical survey of cenotes of Yucatan. En A. S. Pearse, E.-P. Creaser, F. Hall, C.-L. Hubbs, *The Cenotes of Yucatan: A Zoological and Hydrographic Survey*. Washington: Carnegie Institution of Washington, pp 5-16
- Hanshaw, B. B., Back, W. (1980). Chemical mass-wasting of the northern Yucatan Peninsula by groundwater dissolution. *Geology*, 8(5), 222–224. doi:10.1130/0091-7613(1980)8<222:CMOTNY>2.0.CO;2
- Henry, J. G., Heink, G. W. (1999). *Ingeniería Ambiental (2ª)*. México: Prentice Hall.
- Hernández-Arana, H. (2020). Conectividad entre ecosistemas costeros y vías de comunicación: impactos y efectos trasladados. Foro virtual de discusión y análisis: El futuro de la península de Yucatán. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=1scoOe0gHRo>
- Hernández-Terrones, L. -V., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le-Cossec, A., Monroy-Ríos, E. (2011). Groundwater Pollution in a Karstic Region (NE Yucatan): Baseline Nutrient Content and Flux to Coastal Ecosystems. *Water Air Soil Pollut*. doi:218. 517-528. 10.1007/s11270-010-0664-x
- Herrera-Silveira, J. (2006). Lagunas costeras de Yucatán (SE, México): Investigación, diagnóstico y manejo. *Rev. Ecotropicos*, 19(2), 94-108.
- Herrera-Silveira, J., Comín, F., Filograsso, L. (2013). Landscape, Land Use, and Management in the Coastal Zone of Yucatan Peninsula. *Environ Sci*, 225-242.
- IMTA, I. M. (2019). Aguas Subterráneas. Recuperado el 30 de enero de 2022, de <https://www.gob.mx/imta/articulos/aguas-subterranas>
- INEGI (2002). Estudio hidrológico del estado de Quintana Roo (1ª). Aguascalientes, Ags. México, pp 96
- Iturralde-Vinent, M. (2005). La Paleogeografía del Caribe y sus implicaciones para la biogeografía histórica. *Rev. del Jardín Botánico Nacional*, 49-78.
- JICA y SEMARNAT, (2004). Estudio de manejo de saneamiento ambiental en la costa del estado de Quintana Roo en los Estados Unidos Mexicanos. Chetumal: Kokusai Kogyo Co., Ltd. Retrieved Febrero 22, 2022, from https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11775202_01.pdf

- Kandasamy, K., Bingham, B. (2001). Biology of Mangroves and Mangrove Ecosystems. *Advances in Mar Biol.*, 40, 81-251. doi:10.1016/S0065-2881(01)40003-4
- Kauffer Michel, E. F., Villanueva Aguilar, C. L. (2011). Retos de la gestión de una cuenca construida: La Península de Yucatán en México.: Challenges of water management in a constructed watershed: The Yucatan Peninsula Watershed in Mexico. *Aqua-LAC*, 3(2), 81-91. doi:10.29104/phi-aqualac/2011-v3-2-01
- Lagomasino, D., Herrera-Silveira, J., Miralles-Wilhelm, F., Merediz-Alonso, G., Gomez-Hernandez, Y. (2015). Connecting Groundwater and Surface Water Sources in Groundwater Dependent Coastal Wetlands and Estuaries: Sian Ka'an Biosphere Reserve, Quintana Roo, Mexico. *Estuaries Coast*, 38(5), 1744–1763. doi: 10.1007/s12237-014-9892-4
- Lal, R., Shukla, M. (2004). *Principles of Soil Physics*. New York: Marcel Dekker.
- Lee, D. R. (1997). A device for measuring seepage flux in lakes and estuaries. *Limnol Oceanogr*, 140-7.
- Lefticariu, M., Perry, E. C., Ward, W. C., Lefticariu, L. (2006). Post-Chicxulub depositional and diagenetic history of the. *Sediment Geol*, 183(1-2), 51-69. doi: 10.1016/j.sedgeo.2005.09.008
- Ley de Aguas Nacionales. (s.f.). en el Diario Oficial de la Federación, el 1° de diciembre de 1992; texto vigente con última reforma publicada en Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 2020. Obtenido de https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_060120.pdf
- Libes, S. M. (2009). *Introduction to Marine Biogeochemistry*. Elsevier/Academic.
- Lloyd, J., Heathcoat, J. (1985). *Natural Inorganic Hydrochemistry in Relation to Groundwater: An Introduction*. (Clarendon Press, Ed.) Universidad de Wisconsin - Madison: Oxford science publications.
- López-Ramos, E. (1979). Estudio Geológico de la Península de Yucatán. *Boletín de la asociación mexicana de geólogos petroleros*, 25(1-3), 23-75. Recuperado el 14 de febrero de 2022
- Lugo-Hubp, J., Aceves-Quesada, J.-F., Espinosa-Pereña, R. (1992). Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán. *Rev. RMCG*, 10(2), 143-150. Retrieved febrero 22, 2022, from <http://www.rmcmg.unam.mx/index.php/rmcmg/article/view/1236>
- Macedo, M., Castello, L. (2016). El estado de la Amazonia: conectividad de agua dulce y salud de los ecosistemas. (C. C. D. Oliveira, Ed.) *Iniciativa Amazonia de WWF*, 138.
- Marín, L. E. (1990). *Field investigations and numerical simulation of the karstic aquifer of northwest*. Doctor of Philosophy, Northern Illinois University, Geology, Dekalb, Illinois.

- Marín-Stillman, L.E., Pacheco-Ávila, J.G., Méndez-Ramos, R. (2004). Hidrogeología de la Península de Yucatán. In: Jiménez, B., Marín, L., (Eds.), El agua en México, vista desde la Academia. Academia Mexicana de Ciencias. México, D. F. pp. 159-176.
- Merino Ibarra, M., Otero, L. (1990). Atlas Ambiental Costero, Puerto Morelos - Quintana Roo. (CIQROO, Ed.)
- Mulligan, A., Evans, R., Lizarralde, D. (2007). The role of paleochannels in groundwater/seawater exchange. *J Hydrol (Amst)*, 35(3-4), 313-329.
- Muñoz-Euán, N. B. (2019). Vulnerabilidad del Recurso Hídrico desde la perspectiva Socioambiental en dos localidades de Quintana Roo, México. Tesis De Maestría, CICY, México.
- Murray, B. R., Zeppel, M. J. B., Hose, G. C., Eamus, D. (2003). Groundwater-dependent ecosystems in Australia: It's more than just water for rivers. *Ecol Manage Restor*, 4(2), 110-113. <https://doi.org/10.1046/j.1442-8903.2003.00144.x>
- Nielsen, P. (1990). tidal Dynamics of the Water Table in Beaches. *Water Resour Res*, 26, 2127-2134.
- NMX-AA-099-SCFI-2006, D. (2006). Análisis de agua – Determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales y residuales –métodos de prueba. Norma oficial mexicana, México.
- Null, K., Sieyes, N., Rebolledo-Vieyra, M., Hernández-Terrones, L. (2014). Composition and fluxes of submarine groundwater along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula. *Cont Shelf Res*, 77, 38-50.
- Ordoñez-Gálvez, J. J. (2011). Cartilla Técnica: ¿Qué es una cuenca hidrológica? En J. J. Ordoñez-Gálvez. Lima-Perú: Sociedad Geográfica de Lima.
- Orellana, R., Espadas Manrique, C., Conde, C., Gay García, C. (2009). Atlas de escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán. Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- Orozco-Uribe, L. C. (2020). Interacciones de los ecosistemas-sistemas gravitacionales de agua subterránea. Webinars Pronaces Agua y Cuencas. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=Li2P5B49ggM>
- Pacheco-Ávila, J., Pat-Canul, R., Cabrera-Sansores, A. (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Rev. Ingeniería*, 6(3), 73-81. Retrieved febrero 2022, from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46760308>

- Pacheco-Martínez, J. I., Alonzo-Salomón, L. A. (2003). Caracterización del material calizo de la formación Carrillo Puerto en Yucatán. *Rev. Ingeniería*, 7(1), 7-19. Retrieved febrero 14, 2022, from <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46770101>
- Paredes, D., Kuschik, P., Mbvette, T., Stange, C., Müller, R., Köser, H. (2007). New Aspects of Microbial Nitrogen Transformations in the Context of Wastewater Treatment. *Eng Life Sci.*, 7(1), 13-25. doi:10.1002/elsc.200620170
- Parsons, T.R., Maita C.M. L. (1984). A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, Elmsford, N.Y.
- Peñuela-Arévalo, L. A., Carrillo-Rivera, J. J. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas (Mx)*(81), 18-32. Recuperado el 1 de febrero de 2022, de <https://www.redalyc.org/comocitar.oa?id=56928293003>
- Pérez-Gómez, J. A. (2019). Indicadores de enriquecimiento de nutrientes en ecosistemas costeros del norte del caribe mexicano. Tesis de Maestría en Ciencias del Agua, CICY, Cancún, México.
- Pérez-Gómez, J., García-Mendoza, E., Olivos, A., Rebolledo-Vieyra, M., Delgado-Pech, B., Almazán-Becerril, A. (2020). Indicators of nutrient enrichment in coastal ecosystems of the northern Mexican Caribbean. *Ecol Indic.* 118(106756). doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106756
- Pernía Llera, J. M.-R. (1993). Las aguas subterráneas. Importancia y perspectivas. Madrid, España: Instituto Tecnológico Geominero de España. Recuperado el 9 de febrero de 2022
- Perry, E., Velázquez - Oliman, G., Marín, L. (2002). The Hydrogeochemistry of the Karst Aquifer System of the Northern Yucatan Peninsula, Mexico. *Int Geol Rev*, 44(3), 191-221. doi:10.2747/0020-6814.44.3.191
- Ponce, J., Acosta-González, G., Cejudo, E. (2020). La precipitación histórica y la extracción del agua subterránea en la península de Yucatán: una reflexión. Cancún, Quintana Roo: Projects: Línea de Agua Meteórica de la Península de Yucatán (Yucatan Peninsula Meteoric Water Line) Mexican association about karst studies, Asociación mexicana de estudios del Karst (AMEK) Modelación del Ciclo del Agua en la Península de Yucatán.
- Ponce, V. M. (2016). El Mito de la Evaluación del Agua Subterránea. Recuperado el 30 de enero de 2022, de http://ponce.sdsu.edu/el_mito_de_la_evaluacion_del_agua_subterranea.html#connections
- Pozo, C., Armijo-Canto, N., Calmé, S. (2011). Riqueza Biológica de Quintana Roo: un análisis para su conservación (Vol. Tomo I). México D.F: ECOSUR, CONABIO, Gobierno del Estado de Quintana Roo y PPD.

- Pringle, C. M. (2001). Hydrologic Connectivity and the Management of Biological Reserves: A Global Perspective. *Ecol Appl.* 11(4), 981-998. doi:10.2307/3061006
- Rabadán, J. A. (2019). Evaluación hidrogeológica para determinar el comportamiento de los sistemas de flujo subterráneo: Obrajuelo-Querétaro. Tesis de Maestría, IMTA, coordinación de desarrollo profesional e institucional, Jiutepec, Morelos.
- Reddell, J. (1981). review of the cavernicole fauna of Mexico, Guatemala, and Belize. Austin, Texas: Bulletin of the Texas Memorial Museum.
- Ríos-Tobón, S., Agudelo-Cadavid, R. M., Gutiérrez-Builes, L. A. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Rev. Facultad Nacional de Salud Pública*, 35(2), 236-247. doi: 10.17533/udea.rfnsp.v35n2a08
- Robinson, C., Xin, P., Li, L., and Barry, D. A. (2014), Groundwater flow and salt transport in a subterranean estuary driven by intensified wave conditions, *Water Resour. Res.*, 50, 165–181, doi:10.1002/2013WR013813
- Rodríguez-Zúñiga, M., Troche-Souza, C., Vázquez-Lule, A. D., Márquez-Mendoza, J. D., Vázquez- Balderas, B., Valderrama-Landeros, L., Díaz-Gal. (2013). Manglares de México/ Extensión, distribución y monitoreo. México, D.F: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Rohde, M. M., Matsumoto, S., Howard, J., Liu, S., Riege, L., Remson, E. J. (2018). Groundwater Dependent Ecosystems under the Sustainable Groundwater Management Act: Guidance for Preparing Groundwater Sustainability Plans. *J Nat Conserv*, 93.
- Rosenfeld, J. H. (2002). El potencial económico del Bloque de Yucatán en México, Guatemala y Belice. *Bol. Soc. Geol. Mex* 55(1), 30-37. doi:10.18268/BSGM2002v55n1a3
- Sale, P., Van-Lavieren, H., Ablan-Lagman, M., Atema, J., Butler, M., Fauvelot, C., Stewart, H. (2010). Conservando la Conectividad de los Arrecifes: Guía Para los Administradores de las Áreas Marinas Protegidas. Melbourne, Australia: Currie Comunicaciones.
- Sánchez y Pinto, I. A.-M.-A. (2015). Evidencia de flujo preferencial al mar, del Cenote Caletita, en Cozumel, México. *Rev. Ingeniería*, 19(1), 1-12. Recuperado el 8 de febrero de 2022, de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46750924001>
- Sánchez, S. R. (2017). Hidrología superficial y subterránea. Createspace Independent Pub.
- Sánchez-Sánchez, J. A.-L.-Á.-H.-B. (2015). Caracterización Hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sur del Estado de Quintana Roo, México. *Rev. RMCG*, 32(1), 62-76. Recuperado el 9 de febrero de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1026-87742015000100006

- Schmitter-Soto, J., Escobar-Briones, E., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Marín, L. (2002). Los cenotes de la península de Yucatán. In J. G.-C. Guadalupe de la Lanza-Espino (Ed.), *Lagos y presas de México* (2 ed., pp. 337-381). México, DF: AGT Editor. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/228984086_Los_cenotes_de_la_Peninsula_de_Yucatan
- SEDUMA, S. D. (2011). Proyecto: Saneamiento y Manejo Integral de Cenotes (Sitio RAMSAR Anillo de Cenotes).
- SGM, S. G. (2007). Carta Geológico-Minera, Estados de: Campeche, Quintana Roo y Yucatán, escala 1:500,000. Recuperado el 14 de febrero de 2022, de <https://www.sgm.gob.mx/CartasPdf/GeologicasL.jsp>
- Sheppard, C.-R., Davy, S.-K., Pilling, G.-M., Graham, N.-A. (2018). *The Biology of Coral Reefs*. New York: Oxford University Press.
- Street, J., Knee, K., Grossman, E., Paytan, A. (2008). Submarine groundwater discharge and nutrient addition to the coastal zone and coral reefs of leeward Hawái. *Mar Chem.* 355-376.
- Stumm, W., Morgan, J. J. (1996). *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters* (3rd). New York: Wiley.
- Taylor, P. D., Fahrig, L., Henein, K., Merriam, G. (1993). Connectivity Is a Vital Element of Landscape Structure. *Oikos*, 68(3), 571–573.
- Taylor, P., Fahrig, L., With, K. (2006). *Landscape Connectivity: A Return to the Basics*. In K. & Crooks (Ed.), *Connectivity Conservation*, *Conserve Biol.* Cambridge University Press, pp. 29-43
- Templado, J., Capa, M., Guallart, J., Luque, A. (2009). 1170 Arrecifes. VV.AA., *Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*, 149.
- Tischendorf, L., Fahrig, L. (2000). On the usage and measurement of landscape connectivity. *Oikos*, 90, 7-19. doi: doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.900102
- Todd, D. K., Mays, L. W. (2004). *Groundwater Hydrology*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Tóth, J. (1936). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J Geophys Res.* 68(16), 4795-4812. doi: doi.org/10.1029/JZ068i016p04795Citations: 838
- Tóth, J. (2000). Las aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Bol. GME*, 111(4), 9-26.
- Tóth, J. (2009). *Gravitational Systems of Groundwater Flow: Theory, Evaluation, Utilization*. Cambridge University Press. doi: doi.org/10.1017/CBO9780511576546

- Van Cappellen, P. D. (2002). Biogenic silica dissolution in the oceans: Reconciling experimental and field-based dissolution rates. *Global Biogeochem Cycles*. doi:10.1029/2001GB001431
- Velázquez-Torres, D., Ceballos-Martínez, R. R. (2010). Una aproximación a la geografía física del sur de Quintana Roo, Península de Yucatán, México. (U. N. Territorial, Ed.) *Proyección* (8), 45-63. Recuperado el febrero 14, 2022, de <https://bdigital.uncu.edu.ar/11500>
- Vicente-Vicente, D. (2011). Estudio de las descargas de agua subterránea submarina en las costas del sector sur del Golfo de Valencia. Trabajo final de Carrera, Gandía.
- Vidal-Abarca, M. (2016). La gestión sostenible de ecosistemas acuáticos continentales, aguas costeras y de transición: hábitats, biodiversidad y funciones hidrogeomorfológicas. *El agua: Perspectiva Ecosistémica y Gestión Integrada*, pp 120-184
- Ward, J. V. (1989). Four-Dimensional Nature of Lotic Ecosystems. *Journal of the North J North Am Benthol Soc*, 8(1), 2-8. doi:10.2307/1467397
- Zamboni, A., Nicolodi, J. L., Serrano-Léllis, F., Nunes-Garcia, A., Barroso-Fonseca, G. (2009). La gestión integrada de zonas costeras y cuencas hidrográficas en Brazil. In A. Matarán Ruiz (Ed.), *Espacio litoral y sostenibilidad: una vision multidisciplinar desde las ciencias ambientales* (Edición 1 ed., pp. 111-138). Cádiz (España): Universidad de Cádiz.
- Zamora, P. B., Cardenas, M. B., Lloren, R., Siringan, F. P. (2017). Seawater-groundwater mixing in and fluxes from coastal sediment overlying discrete fresh seepage zones: A modeling study. *J. Geophys. Res. Oceans*. 122, 6565–6582. doi:10.1002/2017JC012769

ANEXO

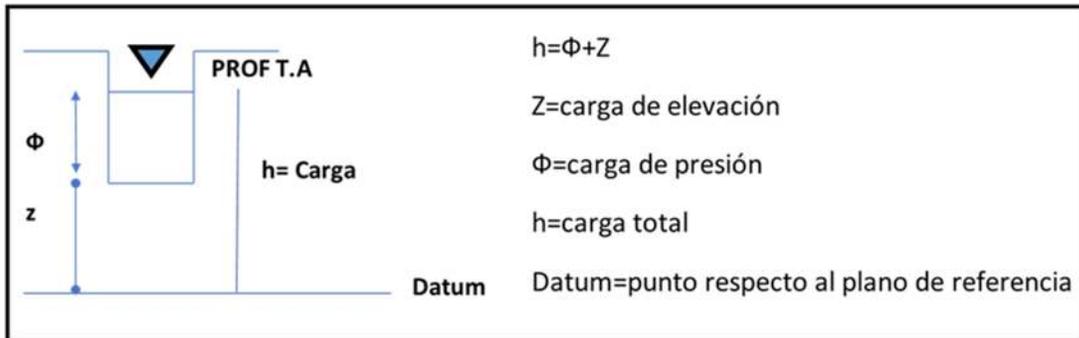


Figura A1. Ejemplo de cálculo de carga hidráulica.

Tabla A1. Cálculos de cargas hidráulicas en los cuerpos de agua de los sitios estudiados.

Cálculo 1. Sitio 4.2. Cenote Laguna Datum1 = 4.31 m.s.n.m Profundidad TA = 0.32 m Datum-Profundidad TA $4.31 \text{ msnm} - 0.32 \text{ m} = 3.99 \text{ m}$	Cálculo 6. Sitio 7. Playa 1, secas Datum6 = 2.18 m.s.n.m Profundidad TA = 0.76 m Datum-Profundidad TA $2.18 \text{ msnm} - 0.76 \text{ m} = 1.42 \text{ m}$
Cálculo 2. Sitio 4. Cenote Domo Datum2 = 6.82 m.s.n.m Profundidad TA = 2.02 m Datum-Profundidad TA $6.82 \text{ msnm} - 2.02 \text{ m} = 4.81 \text{ m}$	Cálculo 7. Sitio 7. Playa 2, secas Datum7 = 2.18 m.s.n.m Profundidad TA = 0.50 m Datum-Profundidad TA $2.18 \text{ msnm} - 0.50 \text{ m} = 1.68 \text{ m}$
Cálculo 3. Sitio 3. Cenote Verde Lucero Datum3 = 8.26 m.s.n.m Profundidad TA = 3.73 m Datum-Profundidad TA $8.26 \text{ msnm} - 3.73 \text{ m} = 4.53 \text{ m}$	Cálculo 7. Sitio 7. Playa 3, secas Datum7 = 2.18 m.s.n.m Profundidad TA = 0.70 m Datum-Profundidad TA $2.18 \text{ msnm} - 0.70 \text{ m} = 1.48 \text{ m}$
Cálculo 4. Sitio 2. Manglar Datum4 = 1.86 m.s.n.m	Cálculo 8. Sitio 7. Playa 1, Lluvias Datum7 = 2.18 m.s.n.m

Profundidad TA = 0.76 m Datum-Profundidad TA $1.86 \text{ msnm} - 0.76 \text{ m} = 1.10 \text{ m}$	Profundidad TA = 0.70 m Datum-Profundidad TA $2.18 \text{ msnm} - 0.70 \text{ m} = 1.46 \text{ m}$
Cálculo 5. Sitio 1. Pozo Niños Héroe Datum5 = 4.08 m.s.n.m Profundidad TA = 3.13 m Datum-Profundidad TA $4.08 \text{ msnm} - 3.13 \text{ m} = 0.96 \text{ m}$	Cálculo 8. Sitio 7. Playa 3, Lluvias Datum7 = 2.18 m.s.n.m Profundidad TA = 0.63 m Datum-Profundidad TA $2.18 \text{ msnm} - 0.63 \text{ m} = 1.55 \text{ m}$