



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA
CARRERA DE BIOLOGÍA
LABORATORIO DE PROYECTOS AMBIENTALES



DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LOS SITIOS “LOS HUNDIDOS (POZAS ROJAS), POZAS AZULES Y EL CHURINCE”, CUATRO CIÉNEGAS COAHUILA, MÉXICO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A :

HERNÁNDEZ LÓPEZ CARMEN FABIOLA

DIRECTORA DE TESIS:

Biól. MARICELA ARTEAGA MEJÍA



CIUDAD DE MÉXICO, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Dedicatoria

“Lo único que se interpone entre tú y tu sueño, es la voluntad de intentarlo y la creencia de que en realidad es posible.”

Joel Brown.

A *mi mamá*, por tu amor y apoyo incondicional, comprensión, cariño, cuidado y paciencia en cada paso que doy, a pesar de las dificultades de la vida. Por interesarte siempre en saber cómo me iba y alentarme cuando todo salía mal. Por soportarme en mis momentos de estrés y enojo, por siempre estar ahí, nunca soltarme y agarrarme con todas tus fuerzas cuando más lo necesité, por desvelarte y acompañarme hasta el amanecer cuando hacía tarea. Gracias por celebrar conmigo cada triunfo, levantarme cuando he caído y animarme a seguir adelante con mis metas. Eres mi ejemplo de fortaleza, porque sin ti no hubiese llegado hasta donde estoy. Te amo.

A *mi hermana*, por ser mi mejor amiga, confidente y cómplice, por estar siempre a mi lado en los momentos más felices y celebrar conmigo, pero sobre todo por estar en los más difíciles de la vida y ser mi ejemplo de superación y responsabilidad, tengo tanto que aprender de ti. Por confiar y creer siempre en mí y el apoyo que me brindas día a día, por los consejos que me das cuando no sé qué hacer y tener siempre las palabras correctas. Gracias por alentarme a cumplir mis metas, nunca dejarme caer y darme fuerzas para continuar. Por ayudarme a sacar adelante la carrera, porque sin tu apoyo y respaldo no podría estar en donde estoy, soy tan afortunada de ser tu hermana. Te amo.

A mis mejores amigas *Leti, Andy y Jenny* por su amistad y apoyo incondicional, por siempre estar en las buenas, las malas y en las peores. Por todos y cada uno de sus consejos, cariño, confianza y comprensión. Por las risas, los momentos vividos dentro y fuera de la universidad, las bromas, la complicidad, las aventuras y las interminables charlas que han dejado en mí una gran huella, gracias. Las quiero mucho.

A *Diego†*, gracias por las pláticas y risas compartidas, por las comidas juntos esperando la hora de nuestra clase, por las travesuras, las clases de baile y sobre todo por aquel último abrazo. Aunque sé que no estás, en mi mente y corazón te llevaré por siempre. Te extraño mucho.

A *Rodrigo†*, gracias por el apoyo que me brindaste, por aquel abrazo y palabras de ánimo cuando más lo necesité, por todas las risas, las bromas, que, aunque a veces no las comprendía siempre me sacaban una sonrisa, por preocuparte si ya había comido y llevarme de comer, sin tu apoyo y consejos no hubiera podido, jamás olvidare todo lo que hiciste por mí. Siempre estarás en mi corazón.





Agradecimientos

“Celebra tus propias victorias, porque nadie más entiende, lo que te costó alcanzarlas.”

Anónimo

A mi Alma Mater, la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, mi segunda casa, por haber permitido formarme en sus aulas y vivir una de las mejores experiencias de mi vida y poder conocer personas extraordinarias.

A la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas región Cuatro Ciénegas y a PRONATURA NORESTE A.C por las facilidades otorgadas y el acceso a la zona núcleo del APFF-CC.

Al Laboratorio de Biología Molecular y Biotecnología del Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 22 (CBTa) “Venustiano Carranza Garza”, Cuatro Ciénegas, Coahuila, por permitir el uso de sus instalaciones para la realización de pruebas analíticas.

A la Dra. A. Lourdes Castillo Granada y al Laboratorio de Espectroscopia de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, por el apoyo recibido para la obtención de las lecturas en Absorción Atómica que permitieron conocer la concentración de metales en las muestras.

A mi directora de tesis, la Bióloga Maricela Arteaga Mejía por guiarme y enseñarme el camino cuando no sabía qué hacer y abrirme las puertas del Laboratorio de Proyectos Ambientales y enseñarme tanto, por apoyarme, comprenderme y siempre creer en mis capacidades como alumna y como profesional, así como la confianza que depositó en mí. Gracias por su maravillosa amistad, y las charlas de las que aprendí y sigo aprendiendo tanto, por cada uno de sus consejos y las risas. Por cuidarme e interesarse en mí y nunca soltar mi mano y darme una palabra de aliento cuando la necesité. Por permitirme el desarrollo de esta tesis y conocer lugares únicos y maravillosos. La quiero y admiro mucho.

A la Bióloga Irene Castillo Chaires, gracias por apoyarme y transmitirme su conocimiento, por darse el tiempo, interesarse y ayudarme en la lectura de mis muestras, por las pláticas y las risas, por siempre preocuparse y decirme “No te vayas tan tarde Fabi”. Gracias.

Al Dr. Jorge Antonio Valdivia Anistro, por el gran apoyo que me brindó, por darse el tiempo y ayudarme cuando lo necesité, por resolver mis dudas, así como por las charlas, bromas y risas. Gracias.





A la Dra. A. Lourdes Castillo Granada, por transmitirme su conocimiento e interesarse en mi investigación y preguntarme siempre como iba, por la confianza, las pláticas y las risas. Por tomarse el tiempo de explicarme. Gracias.

A la Dra. Bertha Peña Mendoza, por todo el apoyo y cariño que me brindó para seguir adelante en la carrera, por la confianza, sus palabras de aliento, por preocuparse, siempre cuidar de mí y defenderme. Gracias por su amistad y tenderme la mano cuando lo necesité, eso nunca lo olvidaré.

A los miembros del jurado: Dr. José Luis Gómez Márquez, Biól. Maricela Arteaga Mejía, Biól. Irene Castillo Chaires, Dr. Jorge Antonio Valdivia Anistro y a la M. en C. Nicté Ramírez Priego, por su disposición y tiempo, ya que sus aportaciones, comentarios y experiencia fueron importantes para mejorar la presente tesis.

A todos los maestros que contribuyeron a mi formación académica durante toda la carrera, transmitiendo sus conocimientos, por su confianza y apoyo, gracias.

A mis amigos: Chuy por tu amistad sincera, por darme ánimos y ayudarme a repasar para los exámenes, por cada uno de tus consejos, pero sobre todo tengo que agradecerle las tardes de risas, anécdotas, bromas, travesuras y música porque sin ello nada hubiera sido igual; Adriana, gracias por tu amistad e invaluable apoyo, por esas tardes de pláticas, chismes, comidas y risas, por tenderme siempre la mano cuando necesité ayuda y por nunca dejarme sola; Ilse, gracias por ayudarme, guiarme y resolver mis dudas al hacer pruebas, por aquellos consejos y esas tardes de risas; Daniel, gracias por tu apoyo y tener siempre la disposición de ayudarme, por tus bromas y consejos a la hora de trabajar. Sin duda ustedes hicieron del campo y laboratorio un lugar más agradable y sobre todo divertido para trabajar. Muchas gracias.

“Nuestra recompensa se encuentra
en el esfuerzo y no en el resultado.

Un esfuerzo total
es una victoria completa.”

Mahatma Gandhi.





ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	2
2.1 Estado del arte de geoquímica y calidad del agua en el VCC	2
2.2 Área Natural Protegida (ANP)	3
2.3 Antecedentes del ANP.....	3
2.3.1 Área de Protección de Flora y Fauna Cuatro Ciénegas (APFFCC)	4
2.3.2 Geología	5
2.3.3 Calidad del agua	5
2.3.4 Geoquímica.....	6
3. PROBLEMÁTICA	7
4. JUSTIFICACIÓN	8
5. ZONA DE ESTUDIO.....	9
5.1 Coahuila de Zaragoza.....	9
5.1.1 Municipio Cuatro Ciénegas de Carranza.....	9
5.2 Caracterización Física y Biológica.....	9
5.2.1 Hidrografía	9
5.2.2 Clima	10
5.2.3 Flora.....	10
5.2.4 Fauna.....	10
5.3 Descripción de los sitios de muestreo	11
5.3.1 Valle Cuatro Ciénegas.....	12
5.3.2 Los Hundidos-Pozas Rojas.....	12





5.3.3	Poza Azul	12
5.3.4	El Churince	13
5.3.5	El Manantial	13
5.3.6	Los Domos	13
6.	HIPÓTESIS	14
7.	OBJETIVOS	14
7.1	Objetivo general.....	14
7.2	Objetivos específicos	14
8.	MÉTODO	15
8.1	Fase de campo	15
8.2	Fase de laboratorio	17
8.3	Fase de gabinete	18
8.3.1	Determinación del ICA	18
8.3.2	Biodegradabilidad: Pérdida de oxígeno.....	19
8.3.3	Biodegradabilidad: Producción de CO ₂	19
9.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	20
10.	CONCLUSIONES.....	45
11.	PERSPECTIVA	45
12.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
13.	ANEXOS.....	56



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Suelos dominantes en los sitios de muestreo.	13
Tabla 2. Localización Geográfica (UTM) de los sitios de estudio.	15
Tabla 3. Parámetros físicos, químicos y biológicos.	16
Tabla 4. Pruebas para el análisis de muestras.	17
Tabla 5. Control de calidad.	17
Tabla 6. ICA: Pesos ponderados de los parámetros.	18
Tabla 7. Rangos de conductividad eléctrica en soluciones.	29
Tabla 8. Clasificación del agua de acuerdo con la dureza.	34
Tabla 9. Datos de pH y Cationes (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) en época de estiaje y lluvia.	37
Tabla 10. Características del color en diez sitios del VCC en temporada de estiaje y lluvia.	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.	9
Figura 2. Zona de muestreo, APFFCC.	11
Figura 3. Cuatro Ciénegas, campaña de muestreo 2019. Sitios de muestreo en temporada de estiaje en los sistemas Los Hundidos-Pozas Rojas, Poza Azul y El Churince, VCC.	15
Figura 4. Cuatro Ciénegas, campaña de muestreo 2019. Sitios de muestreo en temporada de lluvia en los sistemas Poza Azul y El Churince, VCC.	16
Figura 5. Pruebas de biodegradabilidad: Pre-acondicionamiento del inóculo.	19
Figura 6. Relación temperatura y OD.	20
Figura 7. Relación OD, DBO_5 y temperatura.	21
Figura 8. Presencia de ictiofauna en El Manantial.	21
Figura 9. Relación DBO_5 y DQO en siete Pozas del VCC.	22





Figura 10. Presencia antropogénica dentro del sistema El Churince.....	23
Figura 11. Relación DBO ₅ , coliformes totales y fecales de siete pozas del VCC.....	24
Figura 12. Biodegradabilidad: Pérdida de Oxígeno.....	25
Figura 13. Vegetación presente en el VCC.....	26
Figura 14. Biodegradabilidad: Producción de CO ₂ en época de estiaje y lluvia.....	27
Figura 15. Actividades ganaderas dentro del VCC.....	28
Figura 16. Relación CE y temperatura.....	29
Figura 17. Relación pH, temperatura y alcalinidad total.....	30
Figura 18. Relación N-NH ₃ y pH.....	31
Figura 19. Relación Ortofosfato, P hidrolizable y P total.....	32
Figura 20. Desierto Chihuahuense, fauna presente en el sistema El Churince.....	33
Figura 21. Relación Cl ⁻ , dureza total y pH.....	34
Figura 22. Relación dureza total, alcalinidad total y pH.....	35
Figura 23. Los Domos. Tapete microbiano.....	36
Figura 24. Relación pH y Cationes (K ⁺ , Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺).....	37
Figura 25. Relación SO ₄ ²⁻ , CO ₃ ²⁻ y Cl ⁻	38
Figura 26. Relación N-NH ₃ , NO ₂ ⁻ y NO ₃ ⁻	39
Figura 27. Desierto Chihuahuense: Sierra San Marcos.....	40
Figura 28. Cationes (Na ⁺ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Fe ²⁺ , K ⁺ y Mn ⁺).....	41
Figura 29. Restos de un quelonio encontrado en el sistema El Churince, VCC.....	42

ECUACIONES

Ecuación 1. Determinación del ICA.....	18
Ecuación 2. Biodegradabilidad: Pérdida de Oxígeno.....	19
Ecuación 3. Biodegradabilidad: Producción de CO ₂	19
Ecuación 4. Biodegradabilidad: % de degradación.....	19





ANEXOS

Anexo I. Columna Estratigráfica del Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila, México.....	56
Anexo II. Sitios de muestreo dentro del APFFCC.....	57
Anexo III. Métodos estandarizados para la evaluación de parámetros físicos, químicos y biológicos.....	58
i. Alcalinidad Total.....	58
ii. Carbonatos (CO_3^{2-}).....	59
iii. Cloruros (Cl^-).....	60
iv. Color.....	61
v. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5).....	62
vi. Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	63
vii. Dureza Total.....	64
viii. Fósforo Hidrolizable.....	65
ix. Fósforo Total.....	66
x. Nitrógeno Amoniacal (N-NH_3).....	67
xi. Nitratos (NO_3^-).....	68
xii. Nitritos (NO_2^-).....	69
xiii. Cationes (Fe^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mn^+).....	70
xiv. Organismos Coliformes.....	71
xv. Ortofosfatos (PO_4^{3-}).....	72
xvi. Oxígeno Disuelto (OD).....	73
xvii. Pérdida de Carbono Orgánico Disuelto (COD).....	74
xviii. Producción de CO_2	75
xix. Sulfatos (SO_4^{2-}).....	76



RESUMEN

El Valle de Cuatro Ciénegas en el Estado de Coahuila es clasificado a nivel internacional como un sitio RAMSAR y considerado como prioritario debido a sus características únicas y servicios ecosistémicos que brinda a la humanidad, a pesar de ello la actividad agrícola que se desarrolla en la región ha llevado a la extracción de agua, cuya calidad se ve deteriorada debido al manejo inadecuado o por reacciones naturales de interacción.

Por ello, en la presente investigación se determinaron Temperatura, pH, OD, CE, DBO₅, DQO, Alcalinidad total, CO₃²⁻, Dureza total, Cl⁻, PO₄³⁻, Fósforo Hidrolizable, Fósforo Total, N-NH₃, NO₃⁻, NO₂⁻, Organismos Coliformes, SO₄²⁻, Fe²⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, K⁺ y Mn⁺ en dos campañas de muestreo una en temporada de estiaje y la otra en lluvias, se evaluó el comportamiento geoquímico de 10 pozas en los sistemas Los Hundidos-Pozas Rojas, Poza Azul y El Churince, aplicando estándares nacionales o internacionales que establecen los límites máximos permisibles (LMP) en agua y bienes nacionales; asimismo se realizaron pruebas de biodegradabilidad establecidas por la Organización para el Desarrollo y Cooperación Económica (OECD) con el propósito de obtener la calidad del agua y determinar la velocidad de degradación y la capacidad de transformación de diferentes compuestos presentes en las pozas.

Los resultados muestran al Na⁺ como catión dominante en todas las pozas del Valle; asimismo se observó que el pH en época de lluvia, Alcalinidad y Fósforo total en época de estiaje sobrepasan los LMP. Sin embargo, la temperatura, DBO₅, Organismos coliformes, Fe²⁺ y Cl⁻ cumplen con lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996, así como la Ley Federal de Derechos en materia de agua (2019). Por otra parte, Pozas Rojas III, IV, Churince I y El Manantial en época de estiaje, Poza Azul y El Manantial en época de lluvia poseen la capacidad de transformar totalmente (100% degradabilidad) los diferentes elementos oxidables como materia orgánica representados en la DBO, los organismos coliformes y las diferentes formas de nitrógeno en la matriz de estudio; a diferencia de Pozas Rojas I, II, Poza Azul y El Churince II, III en época de estiaje y Los Domos en época de lluvia degradan del 40 al 89%, de estos compuestos.

De acuerdo con los resultados de las pozas estudiadas, Poza Azul es la que presenta una calidad del agua excelente. Por lo que es importante seguir monitoreando el sistema hidrológico Cuatro Ciénegas en temporada de estiaje y lluvia con el propósito de seguir manteniendo este humedal asegurando la continuidad de sus procesos evolutivos ecológicos salvaguardando la diversidad genética de las especies que ahí habitan.

Palabras clave: Cuatro Ciénegas, degradabilidad, calidad del agua, geoquímica.



ABSTRACT

The Valley of Cuatro Ciénegas in the state of Coahuila is classified internationally as a RAMSAR site and considered a priority due to its unique characteristics and ecosystem services that it provides to humanity, despite this the agricultural activity that takes place in the region has led to the extraction of water, whose quality is impaired due to improper handling or by natural interaction reactions.

Therefore, in the present research, Temperature, pH, DO, CE, DBO₅, COD, Total Alkalinity, CO₃²⁻, Total Hardness, Cl⁻, PO₄³⁻, Hydrolyzable Phosphorus, Total Phosphorus, N-NH₃, NO₃⁻, NO₂⁻, Coliform Organisms, SO₄²⁻, Fe²⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Na⁺, K⁺ y Mn⁺ were determined in two sampling campaigns, one in the dry season and the other in rains, the geochemical behavior of 10 pools in the Los Hundidos-Pozas Rojas systems was evaluated, Poza Azul and El Churince, applying national or international standards that establish the maximum permissible limits (MPL) in water and national goods; Biodegradability tests established by the Organization for Development and Economic Cooperation (OECD) were also carried out with the purpose of obtaining water quality and determining the rate of degradation and the transformation capacity of different compounds present in the pools.

The results show Na⁺ as the dominant cation in all the pools of the Valley; it was also observed that the pH in the rainy season, Alkalinity and Total Phosphorus in the dry season exceed the MPL. However, the temperature, DBO₅, Coliform Organisms, Fe²⁺ and Cl⁻ comply with the provisions of NOM-001-SEMARNAT-1996, as well as the Federal Law on Water Rights (2019). On the other hand, Pozas Rojas III, IV, Churince I and El Manantial in the dry season, Poza Azul and El Manantial in the rainy season have the ability to totally transform (100% degradability) the different oxidable elements such as organic matter represented in the BOD, coliform organisms and the different forms of nitrogen in the study matrix; unlike Pozas Rojas I, II, Poza Azul and El Churince II, III in the dry season and Los Domos in the rainy season, they degrade from 40 to 89% of these compounds.

According to the results of the pools studied, Poza Azul is the one with excellent water quality. Therefore, it is important to continue monitoring the Cuatro Ciénegas hydrological system in the dry and rainy season in order to continue maintaining this wetland, ensuring the continuity of its ecological evolutionary processes, safeguarding the genetic diversity of the species that inhabit it.

Keywords: Cuatro Ciénegas, degradability, water quality, geochemistry.



1. INTRODUCCIÓN

Si se considera la explosión demográfica en el planeta, se debe hacer notar que para el 2050 se tendrá un 70% de demanda de agua potable por arriba de lo que se pueda suministrar a nivel mundial (Arriaga, 2012).

El Valle de Cuatro Ciénegas (VCC) localizado en la zona central de Coahuila, se decretó como Área Natural Protegida (ANP) en la categoría de Área de Protección de Flora y Fauna (APFF) el 7 de noviembre de 1994 (DOF, 1994), es considerado el humedal más importante dentro del Desierto Chihuahuense y uno de los más importantes en México y a nivel internacional, está clasificado como el sitio RAMSAR No. 734, por lo que se le considera como prioritario en el mundo (Instituto Nacional de Ecología, 1999). Estos sitios son indispensables por los innumerables servicios ecosistémicos que brindan a la humanidad, que van desde el suministro de agua dulce, alimentos, materiales de construcción, biodiversidad, control de crecidas, recarga de agua subterránea y mitigación del cambio climático (RAMSAR, 2014). El agua que acumulan es abundante, y aflora en forma de pozas, ciénegas, pantanos, ríos, lagunas y canales. La combinación de estas características favoreció el desarrollo de más de 70 especies endémicas de flora y fauna, así como de microorganismos llamados estromatolitos, los cuales habitaban la Tierra hace miles de millones de años (Ortiz y Romo, 2016).

Souza y colaboradores (2003) solicitaron el cierre de algunos pozos. Su solicitud fue atendida, sin embargo, en el año 2006 los que estaban en la zona de fallas se reabrieron. Los investigadores explicaron que, esto, aunado a la presión de otros pozos en funcionamiento, provocó un efecto de sifón, que arrastró el agua por el sistema de cavernas creado por las fallas, esto ocurrió en la laguna Churince. En seis meses se perdió un ecosistema completo; ecosistema que tardó en formarse y se mantuvo durante millones de años. A pesar de que el gobierno federal declaró a Cuatro Ciénegas ANP, comenzó a extraerse agua de lugares circundantes, como el Valle Hundido y Ocampo-Calaveras, para regar los cultivos de alfalfa que se producen en la región, esta actividad agrícola se ha realizado cuando menos hace 20 años y requiere de varios metros cúbicos de agua lo que ha llevado a los productores a perforar pozos cada vez más profundos y cuya calidad se vea deteriorada debido al manejo inadecuado o bien a reacciones naturales de interacción entre el agua subterránea y los minerales (Guerrero, 2007; IMTA *et al.*, 2005)

La geoquímica está involucrada en todos los procesos químicos, físicos y biológicos que conducen a la distribución o redistribución de los elementos a través del tiempo geológico (Ángeles, 2006). La composición química del agua es resultado de procesos de interacción entre la precipitación infiltrada y los minerales de la litología donde circula. Asimismo, el clima y las actividades agrícolas influyen en la calidad y cómo el agua adquiere su composición química (González-Abraham *et al.*, 2012). En este sentido, el presente trabajo de investigación está dirigido a conocer la calidad de agua y su relación con las condiciones geoquímicas en “Los Hundidos-Pozas Rojas, Poza Azul y El Churince”, de Cuatro Ciénegas, Coahuila. Así mismo, se determinará la influencia antrópica sobre el sistema ambiental mencionado.



2. MARCO TEÓRICO

2.1 Estado del arte de geoquímica y calidad del agua en el VCC

La Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) (1980) realizó un estudio enfocado en conocer las características de los acuíferos, condiciones de explotación, magnitud de recarga y calidad del agua en las pozas. El estudio de calidad del agua fue para clasificarla en uso agrícola y el aumento de la relación de absorción de sodio. Este estudio recomendó el incremento en la explotación de los acuíferos mediante pozos con la finalidad de minimizar la evaporación del agua subterránea y que su calidad se vea deteriorada.

Lesser y Asociados S.A de C.V (2001) realizaron trabajos geológicos, geohidrológicos y análisis físico-químicos entre otros en el Valle El Hundido para determinar si existe conexión hidráulica entre los valles El Hundido, Cuatro Ciénegas y Ocampo así como definir el origen del agua de las pozas del Valle Cuatro Ciénegas. La calidad del agua en el VCC la clasificaron de mediana calidad debido a su contenido en sales y con bajo y medio contenido de sodio intercambiable. Como resultado concluyeron que no existe relación entre los Valles El Hundido y Cuatro Ciénegas y que funcionan de manera independiente.

Johannesson *et al.* (2004) realizaron un estudio de hidrología de la región colectaron muestras de agua en pozas y manantiales analizaron temperatura, pH, conductividad y alcalinidad, así como los isotopos hidrógeno y oxígeno. Encontraron que el agua de Cuatro Ciénegas está caracterizada por un pH circunneutral y con alcalinidades bajas. Los datos isotópicos revelaron que el agua subterránea de Cuatro Ciénegas proviene de la recarga en las montañas alrededor del Valle.

Evans (2005) como resultado del análisis químico encontró que existen cinco sistemas de flujo distintos en la cuenca del Valle de Cuatro Ciénegas. Las características físicas de la cuenca, mostraron una mezcla variable dentro de cada sistema, así como sistemas de flujo físico complejos. Además menciona que la química del agua de Cuatro Ciénegas es controlada principalmente por evaporación, aunque existen otros procesos importantes involucrados, como la disolución y precipitación de varias fases minerales. Utilizó el programa PHREEQC para el desarrollo una ruta de reacción y un modelo geoquímico de la mezcla para cada sistema, con el fin de comprender la variabilidad dentro de cada sistema de flujo.

El IMTA en colaboración con la SEMARNAT, CONAGUA e INE (2005) realizaron un estudio en el que se evaluó el comportamiento hidroquímico del agua en el Valle El Hundido y el Valle Cuatro Ciénegas. Los resultados indican que no existe flujo subterráneo de Cuatro Ciénegas a El Hundido y por lo tanto no pueden ser recargadas por este último. En este sentido, el análisis geoquímico e isotópico permitió concluir que el agua subterránea de ambos Valles es de origen pluvial.



2.2 Área Natural Protegida (ANP)

Las ANP, son sometidas a cualquier tipo de explotación, por lo que requieren de la implementación de programas de monitoreo e investigación. Estos programas nos proporcionan información confiable para evaluar los recursos naturales, así como para implementar planes de conservación y manejo que permitan hacer un uso racional y sustentable de las mismas. En el programa de manejo, por su parte, comúnmente se determinan la sub-zonificación y las reglas administrativas de acuerdo con el contenido de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), regulando los usos del suelo y el aprovechamiento de los recursos naturales. La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) administra actualmente 182 áreas naturales de carácter federal que representan 90,839,521.55 Ha y apoya 339 áreas destinadas voluntariamente a la conservación, con una superficie de 506,912 Ha. Las ANP, son el instrumento de política ambiental con mayor definición jurídica para la conservación de la biodiversidad (CONANP, 2019).

En dichas áreas se permite la realización de actividades relacionadas con la preservación, repoblación, propagación, aclimatación, refugio, investigación y aprovechamiento sustentable de las especies mencionadas, así como las relativas a educación y difusión en la materia. Asimismo, las comunidades pueden aprovechar los recursos naturales de acuerdo con las normas oficiales mexicanas y usos del suelo que estén establecidos en la declaratoria del ANP (SEMARNAT, 2008).

2.3 Antecedentes del ANP

En 1989 SEDUE-IPN proponen que la región de Cuatro Ciénegas (PE 23) sea incluida en la categoría de Área Natural Protegida.

Cuatro Ciénegas de acuerdo con SEDESOL (1992), posee una amplia variedad de cuerpos de agua que son diferentes en cuanto a permanencia, temperatura, concentración de sólidos disueltos, iones dominantes, tamaño, superficie y condiciones de drenaje internas y externas. Los manantiales varían de una extensión de 20 Hectáreas y 5 metros de profundidad, a menos de 10 m² y 10 cm de profundidad.

En 1994 se publica en el DOF el decreto donde se declara Área Natural Protegida, con el carácter de Área de Protección de Flora y Fauna, la región conocida como “Cuatro Ciénegas”, con una superficie de 84,347,47 ha. ubicada en el Municipio de Cuatro Ciénegas, Estado de Coahuila.

En Guerrero (2007) Souza y colaboradores (2003) refieren que Cuatro Ciénegas guarda evidencias de dos acontecimientos importantes en la historia de la diversidad biológica en el mundo. El primero es el aumento de la concentración de oxígeno en la atmósfera de la Tierra, hace unos 2 400 millones de años debido a la aparición de bacterias como las que habitan Cuatro Ciénegas, que hacían fotosíntesis y desprenden oxígeno como desecho. El segundo acontecimiento crucial, “fue que en ese lugar se abrió el zipper, la grieta que dividió Pangea”.



Souza *et al.*, 2012, mencionan que la cuenca de Cuatro Ciénegas es un oasis raro en el desierto Chihuahuense. Tiene un endemismo biológico similar al de las Islas Galápagos y sus ecosistemas alimentados por manantiales tienen un contenido muy bajo de nutrientes (nitrógeno o fósforo) y dominados por diversos microbialitos.

El 02 de febrero de 2013 se publica en el DOF el decreto de utilidad pública, para el restablecimiento del equilibrio hidrológico, así como la protección, mejoramiento, conservación y restauración del acuífero de Cuatro Ciénegas en el Estado de Coahuila, por lo que el mencionado acuífero se establece como zona reglamentada para el control de la extracción y de la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas del subsuelo.

García y López, 2017 refieren que dos acontecimientos detonaron su arranque como destino turístico de alcance internacional: el Decreto Federal de 1994 como ANP y en 1995 una publicación de George Grall en la revista National Geographic sobre Cuatro Ciénegas. Sin embargo, con el incremento de la actividad turística aumentaron sus efectos negativos, lo cual llevó a la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) a clausurar dos sitios de uso público en 2004 y 2008.

Vázquez, 2017 expone que el VCC presenta una estructura de comunidades bacterianas muy antigua. Estas comunidades están formadas por un bajo número de microorganismos que son generalmente muy abundantes en la naturaleza (como cianobacterias) y un número muy elevado de microorganismos raros o poco abundantes (como bacterias anoxigénicas y reductoras de azufre).

2.3.1 Área de Protección de Flora y Fauna Cuatro Ciénegas (APFFCC)

El decreto que protege a Cuatro Ciénegas fue el resultado de una serie de peticiones al gobierno federal por parte de organismos no gubernamentales, centros de estudio e investigación, manejadores de áreas protegidas e instituciones internacionales, que por más de 30 años han estudiado y reconocido la importancia del sitio (SEMARNAT, 2016).

El APFFCC representa un lugar de gran importancia biológica y considerada como un laboratorio natural. También es un lugar de gran atractivo turístico, por lo que la afluencia de visitantes aporta una derrama económica para los habitantes de la zona. Dentro de sus líneas estratégicas, el ANP de Cuatro Ciénegas, cuenta con objetivos que van orientados a la Protección y Vigilancia, Manejo, Restauración de los Recursos Naturales del área, así como los orientados a incrementar el conocimiento y la cultura ambiental de los pobladores y visitantes al sitio (Vela *et al.*, 2015). La categorización de APFFCC tiene como objetivo preservar los hábitats naturales de la región y los ecosistemas más frágiles; asegurando así la continuidad de sus procesos evolutivos ecológicos; aprovechando sostenidamente sus recursos naturales y salvaguardar la diversidad genética de sus especies (SEMARNAT, 2016).



2.3.2 Geología

Cuatro Ciénegas se localiza en el límite este de la Isla de Coahuila y en el límite poniente del Golfo de Sabinas, por lo que el marco geológico ([anexo I](#)) ha sido definido por la evolución de estos elementos paleogeográficos. La Isla de Coahuila, con una cobertura sedimentaria marina, exhibe únicamente rocas del Cretácico inferior al superior, mientras que el Golfo de Sabinas exhibe rocas del Jurásico superior al Cretácico superior. La evolución sedimentológica y tectónica refleja exclusivamente los efectos geodinámicos ocurridos a partir de las edades antes mencionadas (Ramírez, 2011).

Dentro del Valle el agua de los manantiales fluye en la superficie a través de canales subterráneos de aluviones kársticos que se unían en el Pleistoceno tardío por un sistema de flujo de agua superficial y una serie de lagos del Desierto Chihuahuense (Wolaver *et al.*, 2008). Los estratos geológicos predominantes en las montañas de Coahuila son del Mesozoico, con un piso en la parte central del Estado de formaciones graníticas y en el Norte por estratos Precámbricos, que, junto con otras rocas del Paleozoico, indican que en estos sitios hubo una masa de tierra adyacente a un mar del Pérmico. En el Mesozoico, emergen las Sierras de Coahuila y el mar se reduce formando la península de Coahuila, los depósitos de yeso en la parte central indican la línea costera y la recesión del mar. Los depósitos ígneos del Terciario, y los sedimentos lacustrinos se encuentran erosionados, pero no modificados (Instituto Nacional de Ecología, 1999).

2.3.3 Calidad del agua

El VCC es reconocido como uno de los desiertos con gran cantidad de agua distinguiéndose este elemento por presentarse en algunas áreas como dulce o salada, fría o caliente (García *et al.*, 2014).

En condiciones naturales existen procesos físicos, químicos y biológicos que permiten mantener relativamente en equilibrio las concentraciones de dichas sustancias, partículas y microbiota. Sin embargo, las actividades humanas pueden modificar la composición química de muchos cuerpos de agua, las cuales alteran su equilibrio dinámico (SEMARNAT, 2016). Aun cuando los ecosistemas acuáticos son capaces de procesarlos y diluirlos hasta cierto grado, en altas concentraciones y sin tratamiento pueden, causar la desaparición de la vegetación y fauna e impedir el aprovechamiento de los recursos hídricos de los cuerpos afectados. Es así como la calidad del agua de un cuerpo depende de múltiples factores, entre los que destacan la calidad y cantidad de las descargas de esta manera dañan tanto a los ecosistemas acuáticos como a la salud humana (SEMARNAT, 2013).

La expansión económica acelerada genera deterioro de la calidad del agua por la sobreexplotación provocando que su calidad pase de aceptable a mala evidenciando un deterioro del agua subterránea en las zonas áridas, que normalmente tienen altas tasas de agotamiento y la disminución de la recarga secundaria de agua de buena calidad (Pino y Coarita, 2018).



2.3.4 Geoquímica

La composición química de las aguas subterráneas es controlada por muchos factores que incluyen la composición de la precipitación, la mineralogía de las cuencas hidrográficas y los acuíferos, el clima y la topografía, frecuentemente es determinada a través de la medición de constituyentes físicos y químicos tales como los cationes: calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) potasio (K^+) y los aniones bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^-) y nitrato (NO_3^-) (Sánchez-Sánchez *et al.*, 2015). La etapa de infiltración a través del suelo es muy importante para la composición química de un agua subterránea, gran parte de la geoquímica del agua se adquiere en los primeros metros de su recorrido asimismo el agua va participando en muchas otras reacciones de oxidación-reducción perdiendo progresivamente su carácter oxidante haciéndose cada vez más reductora. Los oxidantes aportados por el agua son primero el oxígeno y cuando este se agota se comportan como oxidantes los sulfatos y nitratos; si atraviesa yesos se obtendrán SO_4^{2-} y Ca^{2+} , si contiene niveles salinos, con sales cloruradas adquirirá Cl^- y Na^+ , y si atraviesa formaciones calizas adquirirá HCO_3^- y Ca^{2+} (Sánchez, 2012).

Debido a las interacciones químicas y bioquímicas entre las aguas subterráneas y los materiales geológicos por los que fluye y en menor medida a las contribuciones de la atmósfera y de los cuerpos de agua superficiales, las aguas subterráneas contienen una gran variedad de componentes químicos inorgánicos disueltos en diversas concentraciones. Las reacciones de intercambio catiónico más importantes en los sistemas de agua subterránea son los que involucran cationes monovalentes y divalentes como Na^+ - Ca^{2+} , Na^+ - Mg^{2+} , K^+ - Ca^{2+} , K^+ - Mg^{2+} (Freeze y Cherry, 1979). El tipo de catión depende de la litología atravesada por el agua: Ca^{2+} , en carbonatos donde predominan la calcita o plagioclasas cálcicas, ricas en anortita; $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$, en carbonatos de tipo dolomita y en rocas sedimentarias e ígneas, que contienen minerales con abundante Ca^{2+} y Mg^{2+} , $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, fundamentalmente en aluminosilicatos de tipo básico o ultrabásico. Los principales iones que dan idea de la calidad del agua son: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- y NO_3^- (González-Abraham *et al.*, 2012; Cuevas *et al.*, 2001).



3. PROBLEMÁTICA

A pesar de que el gobierno federal declaró a Cuatro Ciénegas ANP en 1994, en el año 2000 comenzó a extraerse agua de lugares circundantes, como el Valle Hundido y Ocampo-Calaveras, para regar los cultivos de alfalfa que se producen en la región. La extracción ha hecho bajar drásticamente los niveles de agua, por lo que algunos de los humedales y diversas pozas se han secado. La alfalfa se siembra en la región cuando menos hace 20 años y la superficie de riego ha aumentado, es un cultivo que requiere agua y esto ha llevado a los productores a perforar pozos cada vez más profundos (Guerrero, 2007).

Existen efectos negativos derivados de la gestión del agua, lo que se traduce en un descontento casi generalizado entre los habitantes de Cuatro Ciénegas hacia las acciones de gestión implementadas por las instituciones involucradas, entre ellas la CONANP y la CONAGUA. Dicho descontento se asocia con la falta de consensos con los usuarios del agua, así como a la falta de información sobre dichas acciones, lo cual genera una especulación sobre las implicaciones que tendrán en la producción de sus cultivos. El resultado es que los usuarios se sienten limitados para llevar a cabo las labores que históricamente han realizado, como las agrícolas. Además, consideran que las acciones de gestión están perjudicando más a los pequeños productores y ejidatarios, no así a los grandes ni a los usuarios de otros Valles, que son quienes utilizan mayores cantidades de agua (Ortiz y Romo, 2016).

Como resultado de la exportación del agua fuera del Valle y su uso dentro del mismo, se provocaron serios disturbios, como son la interconexión artificial de los manantiales, la disminución de las áreas inundadas dentro del Valle y cambios en los niveles de agua en muchas de las pozas. Los cambios en las poblaciones de los organismos que viven en los ambientes acuáticos no han sido cuantificados, por lo que se desconoce el nivel de pérdida (Instituto Nacional de Ecología, 1999).

CONABIO (2004) señala que las principales problemáticas del APFFCC son: 1) la modificación del entorno (deseccación, deforestación, modificación de los cuerpos de agua para uso turístico, construcción de canales para riego y caminos, sobrepastoreo para caballos y cabras y quemas de pastos para ganadería); 2) contaminación por la industria minera y actividades humanas; 3) uso de recursos faunísticos y florísticos (acuicultura no controlada, deforestación, turismo incontrolado, caza furtiva, pesca ilegal); 4) sobreexplotación de recursos hidráulicos; y 5) falta de inventarios y monitoreos de recursos.

El impacto antropogénico provocado en los últimos años por actividades agrícolas, ganaderas, mineras y cambios de uso del suelo ha causado efectos negativos a la calidad del agua de la reserva ecológica del VCC observando las consecuencias producto de la contaminación y de la sobreexplotación en algunas de las pozas del sitio. Aunado a esto, la presencia y asentamiento de distintas empresas agropecuarias, su constante desarrollo agrícola y la incorporación de nuevos pozos a los sistemas de irrigación han provocado abatimientos severos a corto plazo, siendo palpable el régimen interno de explotación al que han sido sometidos los sistemas de pozas (Rodríguez, 2007).



4. JUSTIFICACIÓN

La importancia del ANP Cuatro Ciénegas y la gestión de sus recursos naturales es clara, y así lo muestran los estudios relacionados con la diversidad y existencia de flora y fauna del lugar, que incluyen endemismos; además de trabajos que describen la relevancia del recurso hídrico en cantidad, calidad y vulnerabilidad del acuífero en la región.

Cuatro Ciénegas produce al año aproximadamente 49 millones de m³ de agua en el desierto, su naturaleza kárstica permite la percolación de los recursos hídricos a los mantos acuíferos y la generación de cientos de pozas y canales naturales que generan uno de los principales hábitats para las aves acuáticas y otra fauna silvestre en el Desierto Chihuahuense, es considerado el humedal más importante de la Eco región del Desierto Chihuahuense y uno de los más importantes de México, incluyéndose como sitio prioritario para conservación. La NASA la considera un área de interés científico por su adaptabilidad de bioformas únicas en el mundo y similares a las del planeta Marte. Para las especies de aves acuáticas migratorias que visitan la zona representa un área de gran importancia en su ciclo anual ya que, por su aislamiento y posición geográfica, es un excelente sitio de descanso durante la migración en el Norte de México (Vela *et al.*, 2015)

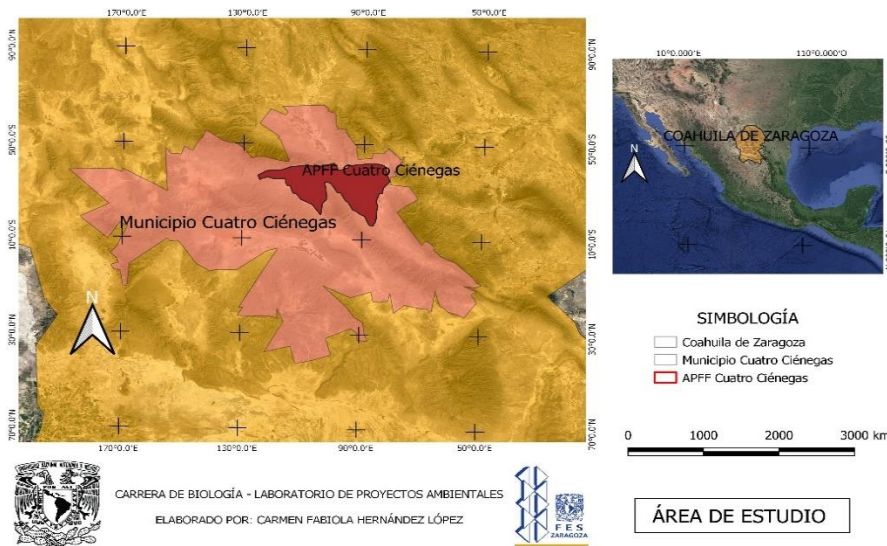
La combinación de estabilidad climática, aislamiento y abundancia de agua pese a lo árido del entorno, parecería como un “mundo perdido”. En las pozas de Cuatro Ciénegas viven los mismos tipos de microorganismos que habitaban la Tierra hace miles de millones de años. Estos ecosistemas son tan valiosos, que muchos científicos han acudido al lugar para aprender sobre la evolución de la vida primitiva en el planeta. El sistema de Cuatro Ciénegas es un sistema muy complejo, donde hay agua de lluvia que ha permeado las rocas y agua de glaciares, que se filtró para formar un gran lago hace millones de años, junto con el agua profunda y antigua que preservó la señal marina. Esto permite la presencia de peces, caracoles, crustáceos, diatomeas y bacterias que conservan características marinas, y que, además, llevan el recuerdo de un mundo sin fósforo, de hace más de 2 000 millones de años (Guerrero, 2007).

Es importante señalar que el impacto antrópico directo e indirecto que recibe el recurso hídrico del VCC por las diversas actividades desarrolladas en él, llevan consigo una exigencia de calidad y cantidad del recurso acelerando su deterioro. Por lo anterior es fundamental que la calidad del agua en estos sistemas cumpla con los criterios y condiciones para diferentes usos, así como su aprovechamiento sustentable para no afectar el equilibrio y las especies endémicas que en él habitan.



5. ZONA DE ESTUDIO

5.1 Coahuila de Zaragoza



El estado de Coahuila se encuentra en el centro de la parte septentrional de la República Mexicana. Está situado entre los 24°32' - 29°51' de LN respecto al Ecuador y entre los 99°58' - 103°57' de LO respecto del WGS84 (INAFED, 2010). Cuenta con una superficie de 151,595 km².

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio. Fuente: Elaboración Propia.

(Secretaría de Economía, 2015). Representa el 7.74% del total de la superficie del país. Coahuila se sitúa como la tercera entidad de mayor extensión territorial de la República Mexicana, después de los estados de Chihuahua y Sonora (Quintanilla, 2001; CONCANACO, 2018; Secretaría de Economía, 2015).

5.1.1 Municipio Cuatro Ciénegas de Carranza

El municipio de Cuatro Ciénegas se localiza en el centro del estado, en las coordenadas 102° 03' 59" LO y 26° 59' 10" LN, a 740 msnm. Cuenta con una superficie de 10,699.80 Km², que representan un 7.06% del total de la superficie del estado. En el municipio se ubican las sierras La Madera y La Fragua, localizadas al noroeste y al oeste respectivamente. Existen en el sur, ramificaciones de las sierras Los Alamillos, Fraga y San Marcos, las cuales abarcan también los municipios de San Pedro y Parras (INAFED, 2010).

5.2 Caracterización Física y Biológica

5.2.1 Hidrografía

Cuatro Ciénegas es parte de la Región Hidrológica Bravo-Conchos, dentro de la Cuenca Presa Falcón-Río Salado, correspondiendo a la Subcuenca Río Salado - Nadadores. El Valle se encuentra dentro de la zona geohidrológica llamada Cuatro Ciénegas-San Miguel, en la cual se han identificado dos fuentes de agua subterráneas. Pozas de la Becerra, Churince, el Anteojo, Escobedo, La Poza de Juan Diego, río Los Mezquites de manantial y lagunas forman los hábitats acuáticos mayores en la cuenca





y posiblemente representan las etapas iniciales del proceso continuo de formación de pantanos (Vela *et al.*, 2015). El patrón de drenaje regional es predominantemente de tipo dendrítico, aunque en algunas áreas es de tipo paralelo y radial. Originalmente el Valle formaba una cuenca cerrada, por lo que es posible que se formaran en la parte más baja pantanos y áreas inundadas someras (Arriaga, 2012; CONABIO, 2004).

Los arroyos que se originan en las sierras que circundan al VCC desaparecen al infiltrarse en las márgenes de los depósitos aluviales permeables, originando corrientes de régimen transitorio, con escurrimientos torrenciales de unas cuantas horas de duración. Posee abundante agua subterránea que emerge a la superficie a través de manantiales alimentados por la lluvia que se infiltra en las sierras circundantes. Las pozas tienen profundidades que van desde menos de un metro hasta diez metros, y diámetros de unos pocos centímetros a doscientos metros. La mayoría de las pozas se localizan en las faldas de la sierra San Marcos y Pinos (Aldama *et al.*, 2007).

5.2.2 Clima

El clima en el municipio es de subtipos secos semicálidos (BW_hx'(w)(e')(w)); la temperatura varía de 0° C en invierno hasta 40° C en verano, con una media anual de 18 a 22°C, la media mensual más alta llega a rebasar los 30° C en junio, julio y agosto, la precipitación promedio anual en el VCC es de 219 mm y la evaporación potencial de más de 2000 mm. El periodo de lluvias corresponde a los meses de mayo a octubre y el periodo de estiaje se presenta de noviembre a abril. Septiembre es el más lluvioso con 41.3 mm y el menos lluvioso es marzo con precipitación de 5.5 mm. Se ha estimado que en el VCC este clima ha existido por más de 30 mil años (IMTA *et al.*, 2005; García y López, 2017).

5.2.3 Flora

En el APFFCC la vegetación se encuentra repartida entre pastizal halófilo y vegetación acuática en el piso de la cuenca; en las dunas de yeso se albergan especies endémicas de plantas gypsófilas, también matorral xerófilo y matorral submontano en las partes más elevadas. El piso del Valle sobre el cual se encuentra el área de protección es un sitio plano, sobre la cota de 700 msnm. En el Valle se encuentran por lo menos 837 especies de plantas vasculares y se reportan 23 taxa endémicos. Por efecto de su clima y suelos, presenta al igual que la mayor parte del estado asociaciones vegetales características del desierto Chihuahuense, dentro de los tipos de vegetación que podemos encontrar están: Matorral desértico rosetófilo, Matorral desértico micrófilo, Matorral desértico de transición, vegetación halófila, vegetación gypsófila, vegetación acuática y semiacuática (Instituto Nacional de Ecología, 1999).

5.2.4 Fauna

Su composición faunística es de las más estudiadas en las zonas áridas de México, siendo algunos de los grupos más estudiados: crustáceos (12 especies, 50% endémicos), moluscos (7 familias, 10 especies endémicas de Hydrobiidae), peces (16 especies de las cuales 9 son endémicas), reptiles (67 especies, 6 endémicas), aves (61 especies) y mamíferos (no determinado) (Vela *et al.*, 2015).



De acuerdo a la NOM-059-SEMARNAT-2010 la mayoría son especies endémicas o se encuentran en alguna categoría de protección, de las especies del sitio se pueden mencionar por taxón: 1) Peces: *Notropis xanthicara* (Sardinita, carpa de Cuatro Ciénegas) en peligro de extinción, *Cichlasoma minckleyi* (Mojarra de Cuatro Ciénegas) en peligro de extinción; 2) Reptiles y Anfibios: *Terrapene coahuila* (tortuga de Cuatro Ciénegas, tortuga negra) amenazada y *Scincella lateralis* (encinela norteña) con protección especial ; 3) Mamíferos: *Odocoileus virginianus* (venado cola blanca), *Puma concolor* (puma, león de montaña). Durante la temporada migratoria se reportan especies de aves como: *Anas strepera* (pato friso), *Anas platyrhynchos* (pato de collar), *Anas clypeata* (pato cuchara, pato común) y *Grus canadensis* (grulla gris) (Vela et al., 2015).

5.3 Descripción de los sitios de muestreo

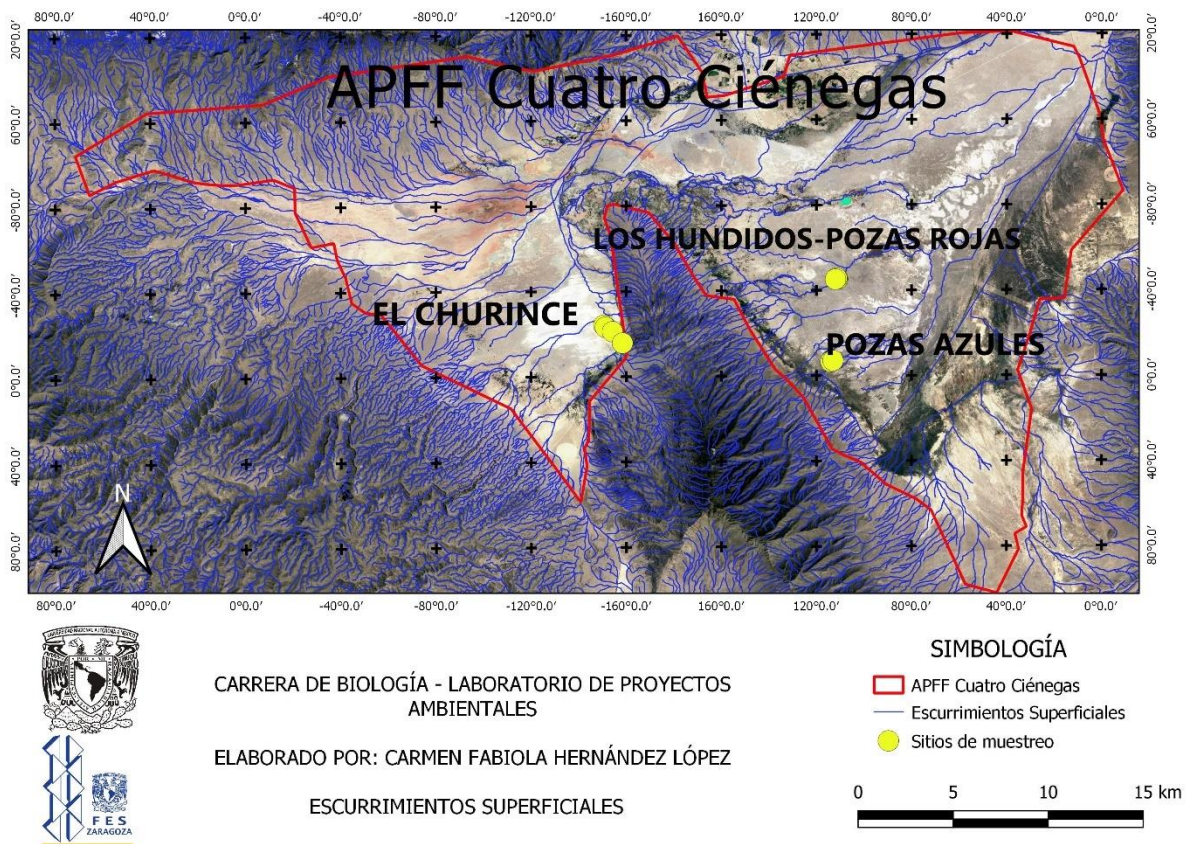


Figura 2. Zona de muestreo, APFFCC. Fuente: Elaboración propia.





5.3.1 Valle Cuatro Ciénegas

Cuatro Ciénegas es un Valle pequeño, localizado en las coordenadas 26° 45' 00" y 27° 00' 00" LN; 101° 48' 49" y 102° 17' 53" LO (Espinosa, 2005) sobre una cota de 700 msnm, es también conocido como un bolsón: un área de las montañas, en las regiones áridas, donde el agua de lluvia no tiene salida superficial hacia el mar (Instituto Nacional de Ecología, 1999). Es una cuenca endorreica, la red de drenaje es de tipo dendrítica, paralela y radial, está conformada, por arroyos de régimen transitorio que bajan de las sierras circundantes, cuyos escurrimientos torrenciales de corta duración se infiltran en las márgenes del Valle a través de los depósitos aluviales permeables que lo rellenan (Ramírez, 2011). Mide cerca de 40 kilómetros de este a oeste y 30 de norte a sur. Lo cruzan por la mitad la Sierra de San Marcos y la Sierra de Pinos (Guerrero, 2007). El APFF ocupa más de 84 mil hectáreas del piso de un Valle (figura 2), incluye ambientes acuáticos representados por manantiales conocidos localmente como pozas. También se encuentran arroyos permanentes y áreas inundadas donde se concentra el agua de los manantiales, conocidas localmente como lagunas (Instituto Nacional de Ecología, 1999). Presenta suelos de tipo Leptosol (48.7%), Calcisol (23.2%), Regosol (11.8%), Solonchak (7.2%), Gypsisol (2.8%), Luvisol (2.1%), Cambisol (1.7%), Phaeozem (1.1%), Kastañozem (0.7%), Solonetz (0.2%), Fluvisol (0.2%), Arenosol (0.1%) y Vertisol (0.1%) (tabla 1) (INEGI, 2009). La vegetación se encuentra representada por Matorral desértico rosetófilo (*Agave lechuguilla* y *Euphorbia antisiphilitica*), Matorral desértico micrófilo (*Larrea tridentata* y *Fouqueria splendens*), Matorral desértico de transición (*Prosopis glandulosa* y *Salsola ibérica*), vegetación halófila (*Distichlis spicata* y *Atriplex canescens*), vegetación gypsófila (*Dasyilirion palmeri* y *Ephedra trifurca*), áreas sin vegetación aparente (*Cynodon dactylon*), vegetación acuática y semiacuática (*Nymphaea ampla* y *Juncus torreyi*) (Instituto Nacional de Ecología, 1999).

5.3.2 Los Hundidos-Pozas Rojas

El sistema Pozas Rojas se encuentra al este del VCC (26°50' N; 102°1' O) ([anexo II](#)) e involucra pequeños estanques de desecación en los que el volumen de agua se reduce drásticamente en verano y aumenta en invierno a medida que disminuye la evaporación y son alimentados por un río subterráneo que emerge de varios sumideros (García-Oliva *et al.*, 2018; Rebollar *et al.*, 2012). Las pozas son pequeñas pero permanentes, separadas unas de otras por 9 metros o más, alrededor de la poza más grande (Vazquez-Rosas-Landa *et al.*, 2020). El área presenta suelos de tipo Solonchak y Gypsic con vegetación de pastizal halófilo (SIGEIA, 2018).

5.3.3 Poza Azul

La Reserva Pozas Azules se localiza a 26°49'39.01" N, 102°01'26" O ([anexo II](#)) (Arrocha, 2018), tiene una superficie de 5,332 hectáreas, comprendiendo 2,531.37 dentro del APFF de Cuatro Ciénegas y 2,800.63 hectáreas fuera de la misma, localizadas en la Sierra de San Marcos (Raygoza *et al.*, 2006). Alberga aproximadamente el 35% de todas las 200 pozas presentes en el Valle de Cuatro Ciénegas (PRONATURA NORESTE A.C., 2000). Presenta suelos de tipo Xerosol, Lúvicos y Gypsicos, siendo el producto de la evaporación provocada por altas temperaturas que se registran en el Valle. El tipo



de vegetación que domina en el área son la halófila y el pastizal halófilo que se presenta principalmente en el pie de monte (Santillan, 2007).

5.3.4 El Churince

Ubicado en las coordenadas 26°50' N, 102°08' W ([anexo II](#)) (Velez *et al.*, 2016). Abarca una superficie de 1000 m² de largo, por 500 m² de ancho, su profundidad no excede 1 metro (DOF, 2008). Esta área se caracteriza por la presencia de dunas de yeso y por la presencia de suelos eólicos y aluviales. La Laguna Churince está formada por los brotes de manantiales que drenan hacia la parte central de los campos de dunas. Los suelos son principalmente de tipo Solonchak, Regosol, Litosol y Gypsisol. La vegetación es escasa y predominan yucas (*Yucca treculeana*), sotoles (*Dasyllirion palmeri*) y mezquites (*Prosopis glandulosa*). La actividad económica es la ganadería de equinos y actividades con fines recreativos (Instituto Nacional de Ecología, 1999).

5.3.5 El Manantial

El sistema se localiza en las coordenadas 26° 50' 25.1" LN; 102° 08' 03.1" LO ([anexo II](#)), posee una superficie de 10m² con clima muy árido y semicálido, una temperatura media anual entre 18°C en el mes más frío y 22°C en el mes más caliente, vegetación de desiertos arenosos (matorral xerófilo), presenta una sequía muy crítica y una condición de sobreexplotación, predominando los suelos de tipo Solonchak (SC) y Regosol (RG) (SIGEIA, 2018).

5.3.6 Los Domos

Localizado dentro de Pozas Azules a 26° 49' 41.7" LN; 102° 01' 23.5" LO ([anexo II](#)). La superficie de la poza es de aproximadamente 314.159 m². Presenta suelos de tipos Gypsisol (GY), Solonchak (SC) y Calcisol (CL) en el que predomina el pastizal halófilo. Mantiene un porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. (SIGEIA, 2018).

Tabla 1. Suelos dominantes en los sitios de muestreo.

SUELO SITIO	LP	CL	RG	SC	GY	LV	CM	PH	KS	SN	FL	AR	VR	X
VCC	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	-
Pozas Rojas	-	-	-	•	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Poza Azul	-	-	•	-	•	•	-	-	-	-	-	-	-	•
El Churince	•	-	•	•	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-
El Manantial	-	-	•	•	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Los Domos	-	-	-	•	•	-	-	-	-	-	-	-	-	-

LP=Leptosol, CL=Calcisol, RG=Regosol, SC=Solonchaks, GY=Gypsisol, LV=Luvisol, CM=Cambisol, PH=Phaeozem, KS=Kastañozem, SN=Solonetz, FL=Fluvisol, AR=Arenosol, VR=Vertisol.
Fuente: Elaboración propia con base en datos de CONANP (2010), INEGI (2009), Santillan (2007) y SIGEIA (2018).



6. HIPÓTESIS

Las condiciones ambientales de las pozas “Los Hundidos-Pozas Rojas, Poza Azul y El Churince” en el Valle de Cuatro Ciénegas indican que las acciones de conservación permiten clasificar el agua de los manantiales como de excelente calidad de acuerdo con el ICA, lo que sugiere que no existen diferencias geoquímicas en composición al haber conexión entre pozas.

7. OBJETIVOS

7.1 Objetivo general

Determinar la calidad del agua de pozas en Los Hundidos-Pozas Rojas, Poza Azul y El Churince de Cuatro Ciénegas, Coahuila para analizar el comportamiento geoquímico.

7.2 Objetivos específicos

- Realizar pruebas físicas, químicas y biológicas en los sistemas: Los Hundidos-Pozas Rojas, Poza Azul y El Churince para obtener la calidad del agua.
- Determinar la geoquímica de cada uno de los sistemas para analizar los procesos en las pozas estudiadas.
- Realizar pruebas de biodegradabilidad aeróbica rápida para determinar la velocidad de degradación y la capacidad de transformación de los compuestos en las pozas estudiadas.
- Determinar si los sitios de estudio cumplen con la Ley Federal de Derechos en materia de agua, así como con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 para conocer el posible uso y el impacto antrópico en las pozas estudiadas.



8. MÉTODO

El trabajo se distribuyó en tres fases:

8.1 Fase de campo

Se efectuaron dos muestreos uno en marzo temporada seca y otro en septiembre temporada de lluvias, en 10 pozas de los sistemas Los Hundidos-Pozas Rojas, Poza Azul y El Churince en el Municipio de Cuatro Ciénegas de Carranza, Estado de Coahuila (figura 1). Cada sitio de muestreo fue georreferenciado (tabla 2).

Tabla 2. Localización Geográfica (UTM) de los sitios de estudio.

Sitio	X	Y
Pozas Rojas I (PR I)	0796121	2975654
Pozas Rojas II (PR II)	0796088	2975666
Pozas Rojas III (PR III)	0796069	2975705
Pozas Rojas IV (PR IV)	0796001	2975641
Pozas Azules (PA)	0795759	2970822
Churince I (CH I)	0783822	2973021
Churince II (CH II)	0783901	2972904
Churince III (CH III)	0784276	2972642
Manantial (MTAL)	0784801	2971967
Domos (D)	0795870	2970884

Fuente: Elaboración Propia



Figura 3. Cuatro Ciénegas, campaña de muestreo 2019. Sitios de muestreo en temporada de estiaje en los sistemas Los Hundidos-Pozas Rojas, Poza Azul y El Churince, VCC. 1) PA; 2) PR I; 3) PR II; 4) PR III; 5) PR IV; 6) D; 7) CH I; 8) CH II; 9) CH III; 10) MTAL.



Figura 4. [Fotografías de Valeria Martínez]. (Cuatro Ciénegas, campaña de muestreo 2019). Sitios de muestreo en temporada de lluvia en los sistemas Poza Azul y El Churince, VCC. A) PA; B) MTAL; C) D.

Para la colecta de agua se utilizó un muestreador de polietileno de alta densidad, el muestreo fue instantáneo y superficial ya que los sitios de muestreo se ubican en la zona núcleo del ANP (figura 2), sitio destinado para realizar actividades de investigación y solo fue permitida la colecta de máximo 2 litros de agua superficial por poza estudiada. Asimismo, la colecta fue realizada en presencia de personal de PROFEPA. Las muestras se colocaron en botellas de polietileno o vidrio según la prueba o análisis y se conservaron a 4 °C. Solo se adicionaron conservadores químicos a las muestras si la prueba a realizar lo requería (tabla 3).

Tabla 3. Parámetros físicos, químicos y biológicos.

Prueba	Conservador	Tiempo de Almacenamiento
Alcalinidad Total	S/C	24h a 4°C
Cl ⁻	S/C	24h a 4°C
CO ₃ ²⁻	S/C	24h a 4°C
Color	S/C	7 días a 4°C
Conductividad eléctrica	S/C	N/A
DBO ₅	S/C	24 horas
DQO	H ₂ SO ₄ (2mL/L)	7 días a 4°C
Dureza Total	S/C	6 meses a 4°C
N-NH ₃	H ₂ SO ₄ (2mL/L)	30 días a 4°C
NO ₂ ⁻	H ₂ SO ₄ (2mL/L)	30 días a 4°C
NO ₃ ⁻	H ₂ SO ₄ (2mL/L)	30 días a 4°C
Cationes (Fe ²⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Mn ⁺)	HNO ₃ (2mL/L)	6 meses a 4°C
Organismos Coliformes	Na ₂ S ₂ O ₃	24 horas
Oxígeno disuelto	S/C	8 horas
pH	S/C	N/A
P _{Ort} ofosfato, P _{Hidrosoluble} y P _{Total}	H ₂ SO ₄ (2mL/L)	28 días a 4°C
Pruebas de Biodegradabilidad	S/C	30 días a 4°C
SO ₄ ²⁻	S/C	28 días a 4°C
Temperatura	S/C	N/A

S/C: Sin conservador; N/A: No aplica

Fuente: Elaboración propia con datos de APHA *et al.* (1992), OECD (1992) y Normas Mexicanas.

Se determinaron *In situ*: temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto; asimismo, se determinó la alcalinidad, dureza y cloruros (tabla 4). Del mismo modo, las muestras colectadas para el análisis de Organismos Coliformes fueron trasladadas al laboratorio de Biología Molecular y Biotecnología del Centro de Bachillerato Tecnológico Agropecuario No. 22 (CBTa) ubicado en el municipio de Cuatro Ciénegas de Carranza, para su procesamiento.



8.2 Fase de laboratorio

Se utilizaron procedimientos nacionales e internacionales para determinar la calidad del agua de las pozas (tabla 3 y 4) con aplicación a nivel microescala, cuyo objetivo es minimizar el impacto ambiental que generan los residuos químicos de las pruebas.

Tabla 4. Pruebas para el análisis de muestras.

Prueba	Procedimiento	Método
Alcalinidad Total	NMX-AA-036-SCFI-2001	Indicadores
Cl ⁻	APHA, 1992 (4500-Cl ⁻)	Argentométrico
CO ₃ ²⁻	NMX-AA-036-SCFI-2001	Indicadores
Color	APHA, 1992 (2120 C)	Espectrofotométrico
Conductividad eléctrica (CE)	Medidor CONDUCTRONIC PC16	Electrodo de membrana
DBO ₅	NMX-AA-028-SCFI-2001	Yodométrico
DQO	APHA, 1992 (5220 D)	Espectrofotométrico
Dureza Total	NMX-AA-072-SCFI-2001	Complejométrico
N-NH ₃	NMX-AA-026-SCFI-2010	Método Kjeldahl
NO ₂ ⁻	NMX-AA-154-SCFI-2011	Ácido Sulfanílico
NO ₃ ⁻	APHA, 1992 (4500-NO ₃)	Ácido Fenoldisulfónico
Cationes (Fe ²⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Mn ⁺)	NMX-AA-051-SCFI-2016	Digestión ácida
Organismos Coliformes	APHA, 1992 (9221 B)	Tubo múltiple
Oxígeno Disuelto	Oxímetro HANNA HI 9142 / NMX-AA-012-SCFI-2001	Electrodo de membrana / Yodométrico
pH	Medidor CONDUCTRONIC PC16	Potenciométrico
P _{Ortofosfato} , P _{Hidrosoluble} y P _{Total}	PROY-NMX-AA-029/1-SCFI-2008	Espectrofotométrico
Pruebas de Biodegradabilidad	OECD, 1992 (301 A-B)	Respirométrico
SO ₄ ²⁻	NMX-AA-074-SCFI-2014	Turbidimétrico
Temperatura	Medidor CONDUCTRONIC PC16	Electrodo de membrana

Fuente: Elaboración propia con datos de APHA *et al.* (1992), OECD (1992) y Normas Mexicanas.

Tabla 5. Control de calidad.

Prueba	Limpieza de material vidrio
N-NH ₃ NO ₂ ⁻ NO ₃ ⁻ P _{Ortofosfato} , P _{Hidrosoluble} y P _{Total}	Extrán 5% y disolución de H ₂ SO ₄ al 10%
Organismos Coliformes	Extrán 5% - NaOCl
Pruebas de Biodegradabilidad	Extrán 5% y disolución de HCl al 5%
Cationes (Fe ²⁺ , Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Mn ⁺)	Extrán 5% y disolución de HNO ₃ al 10%
Alcalinidad Total Cl ⁻ CO ₃ ²⁻ Color DBO ₅ DQO Dureza Total SO ₄ ²⁻	Extrán 5%

Fuente: Elaboración propia con datos de APHA *et al.* (1992), OECD (1992) y Normas Mexicanas.



8.3 Fase de gabinete

Se realizó la determinación del ICA con base en WQI, asimismo, se realizaron pruebas de biodegradabilidad intrínseca (pérdida de O₂ y producción de CO₂) (figura 5) para cada uno de los sistemas, realizando una comparación entre ellos.

8.3.1 Determinación del ICA

Con base en los resultados de las pruebas físicas, químicas y biológicas se calculó el Índice de Calidad del Agua (ICA), ajustado a 12 parámetros del Water Quality Index (WQI-NSF).

$$ICA = \sum_{i=1}^n W_i I_i \quad (1)$$

Donde:

W_i = Peso asignado del parámetro i , ponderado entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a uno.

I_i = Índice del parámetro i .

Tabla 6. ICA: Pesos ponderados de los parámetros.

Parámetro	W_i
OD	0.103
DBO ₅	0.096
DQO	0.053
pH	0.063
Sólidos Suspendedos	0.033
Coliformes Totales	0.083
Coliformes Fecales	0.143
Nitratos	0.053
Amonio	0.043
Fosfatos	0.073
Fenoles	0.033
Temperatura	0.043
Alcalinidad	0.055
Dureza Total	0.058
Cloruros	0.068

Fuente: León (1992).



8.3.2 Biodegradabilidad: Pérdida de oxígeno

Para este método, la sustancia problema debió ser no volátil. Asimismo, permitió el uso de densidades microbianas mucho más altas. A la degradación le siguió un análisis de COD a intervalos frecuentes durante un periodo de 28 días. Fue obligatorio realizar el seguimiento en la suspensión de prueba y los blancos del inóculo; por lo que es aconsejable seguir el COD en los otros matraces en paralelo, así como evitar las pérdidas por evaporación. El % de degradación se calculó con la siguiente ecuación (OECD, 1992):

$$D_t = \left[1 - \frac{C_t - C_{bl(t)}}{C_0 - C_{bl(0)}} \right] \times 100 \quad (2)$$

Donde:

C_0 = concentración inicial de COD en el medio que contiene la sustancia de ensayo.

C_t = concentración de COD en el medio que contiene la sustancia de prueba al momento t .

$C_{bl(0)}$ = concentración inicial de COD inoculado en blanco.

$C_{bl(t)}$ = concentración de COD inoculado en blanco al momento t .

8.3.3 Biodegradabilidad: Producción de CO_2

El CO_2 generado se midió por titulación tomando mediciones en intervalos frecuentes para permitir la identificación del comienzo y final de la biodegradación; la prueba duró 28 días, y se expresó como Carbono Orgánico. Los mg de CO_2 producido, así como el % de degradación se calcularon mediante las siguientes ecuaciones (OECD, 1992):

$$mg \ CO_2 = 1.1 \times (50 - mL \ HCl \ titulado) \quad (3)$$

$$\% \ Degradación = \frac{mg \ CO_2 \ producido}{mg \ COT \ agregado \ en \ la \ prueba \times 3.67} \times 100 \quad (4)$$



Figura 5. Pruebas de biodegradabilidad: Pre-acondicionamiento del inóculo.



9. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se presentan los resultados y sus respectivos análisis físicos, químicos y bacteriológicos realizados a las muestras obtenidas en los sistemas: Los Hundidos-Pozas Rojas, Poza Azul y El Churince en el VCC.

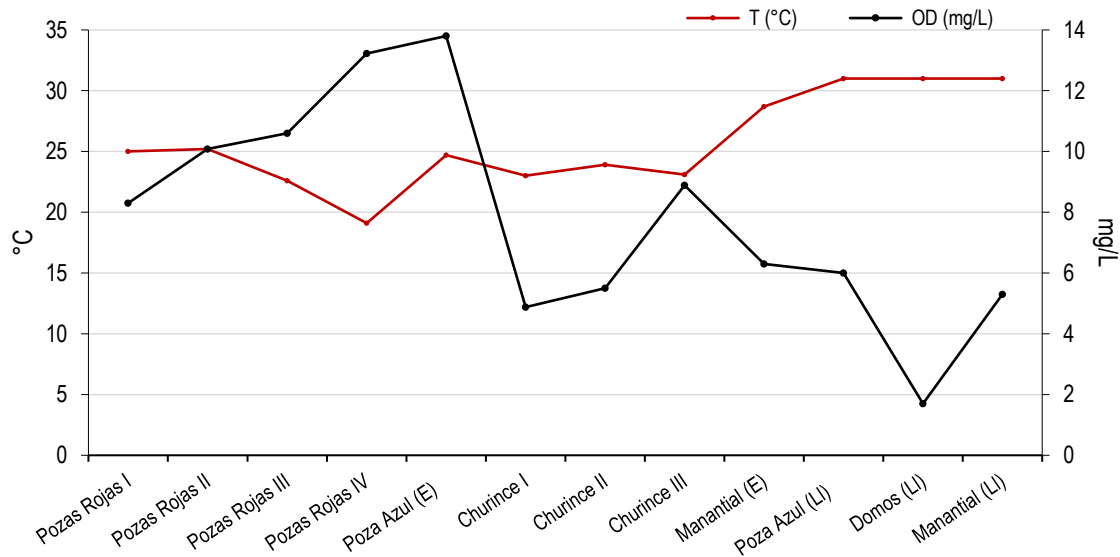


Figura 6. Relación temperatura y OD.

De acuerdo con la NMX-AA-007-SCFI-2000 los registros de temperaturas elevadas en el agua son un indicador de actividad biológica, química y física e influye en la cantidad de oxígeno presente, ya que a mayor temperatura se acelera el proceso fotosintético, así como la remoción de materia orgánica. La temperatura fue monitoreada en 10 pozas del VCC, en las cuatro pozas del sistema Pozas Rojas se obtuvieron valores de 19.1 a 25.2°C con valores de oxígeno disuelto entre 8.3 y 13.2 mg/L en época de estiaje (E). Asimismo, en tres de las pozas de El Churince la temperatura y el oxígeno disuelto oscilan entre los 23.0 y 23.9°C y 4.88 a 8.89 mg/L respectivamente. Por otra parte, los sitios Poza Azul y El Manantial este último ubicado en El Churince registrando 24.7 y 28.7°C respectivamente en época de sequía y en época de lluvia (L) se registraron temperaturas de 31.0°C para ambas pozas. Los Domos en época de lluvias registró 31.0°C y concentraciones de oxígeno disuelto de 1.7 mg/L, esto puede atribuirse a la poca cantidad de agua presente en el sitio cuya profundidad es de aproximadamente 20 cm. Cabe destacar que en este sitio se observan diversos tapetes microbianos con tonalidades de café claro a oscuro (figura 23), lo que indica procesos de metabolización producto del consumo de oxígeno presente en el agua. La temperatura en todas las pozas se encuentra dentro del LMP establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996 que es de 40°C para humedales naturales.

Como se menciona más adelante y de acuerdo con el análisis de resultados Poza Azul y El Manantial son los sitios que registraron la mayor cantidad de agua pura, mientras que Los Domos registró bajo contenido de oxígeno, que de acuerdo con Peña (2007) estos niveles dan soporte al desarrollo de algunos organismos acuáticos y auto regular los diferentes procesos que se llevan a cabo en el agua.

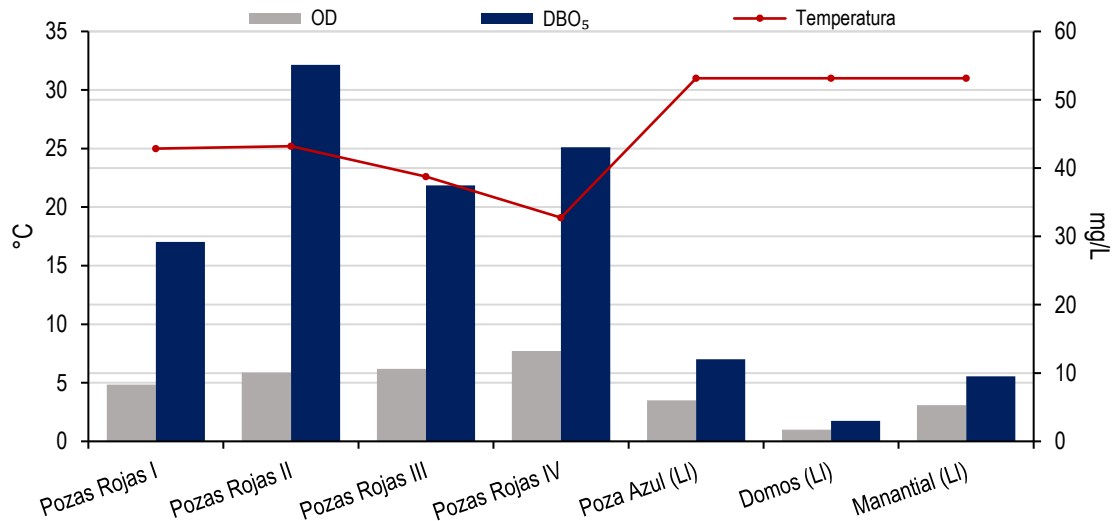


Figura 7. Relación OD, DBO₅ y temperatura.

La determinación de oxígeno disuelto (OD) indica la existencia de condiciones aerobias o anaerobias en el medio, sirviendo como base para cuantificar la DBO. La determinación de la DBO está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que es consumida por los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica (MO) metabolizable y transformado en anhídrido carbónico, H₂O y productos finales (Gil, 1998; Sierra, 2001) y por lo tanto con la temperatura del agua. En temporada de estiaje Pozas Rojas II registró 25.2°C, 10.08 mg/L de oxígeno disuelto y una DBO₅ de 55 mg/L; por el contrario, en Pozas Rojas IV se obtuvo 19.1°C, 13.2 mg/L y 43 mg/L para OD y DBO₅ respectivamente. Por otra parte, en época de lluvias se registró un incremento en la temperatura (31°C) en Manantial, Poza Azul y Los Domos. En este último sitio se registraron 1.7 mg/L de OD y DBO₅ (3 mg/L) seguido del Manantial con 5.3 mg/L de OD y 10 mg/L de DBO₅ y por último Poza Azul con 6 y 12 mg/L de OD y DBO₅, posiblemente, la disminución de O₂ se debe al incremento de temperatura y a la presencia de organismos en el medio acuático (figura 6). Es preciso señalar que los valores registrados de la DBO₅ en las siete Pozas monitoreadas en época de estiaje y lluvias se encuentran dentro de LMP establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 que es de 75 mg O₂/L.



Figura 8. Presencia de ictiofauna en El Manantial.

El análisis de resultados indica que el sistema Pozas Rojas presentó descomposición acelerada de MO, lo que sugiere que este cuerpo de agua es ampliamente dominado por bacterias aerobias, ya que de acuerdo con Isea *et al.* (2015) las concentraciones de DBO₅ aumentan debido a un consumo continuo de OD por el requerimiento de energía para el crecimiento y reproducción de masa bacteriana, principalmente de tipo anaerobio. Mientras que en Los Domos se registró un bajo contenido de DBO₅ y OD ya que de acuerdo con Medina-Chávez *et al.* (2019) durante el periodo de lluvia se forman tapetes microbianos en el cual una comunidad aeróbica externa, aísla a una capa microbiana interna bajo un medio anaerobio rico en metano y azufre.

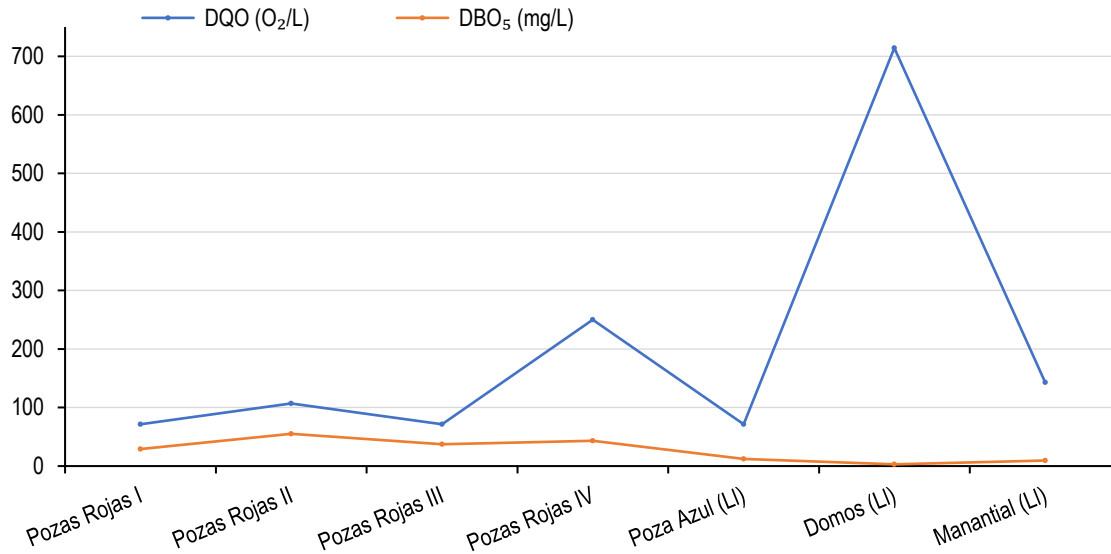


Figura 9. Relación DBO₅ y DQO en siete Pozas del VCC.

La DBO es la cantidad de MO oxidable por microorganismos que será transformada a bióxido de carbono, H₂O y metano principalmente. La DQO es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente los compuestos presentes en el agua (Sánchez, 2008).

En Pozas Rojas se obtuvieron concentraciones de 71.43 a 250 mg O₂/L de DQO en época de estiaje, mientras que en temporada de lluvias para El Manantial y Los Domos se registraron 142.86 y 714.29 mg/L de DQO respectivamente. En ambas épocas la DBO presentó de 3.0 a 55.1 mg O₂/L. Metcalf y Eddy (2003) consideran que para DQO, 250 mg O₂/L es una concentración débil, 430 mg O₂/L es una concentración media y 800 mg O₂/L es una concentración fuerte. Por lo que Los Domos presenta una concentración fuerte de DQO, los seis sitios restantes registraron una concentración débil. Las altas concentraciones de DQO provocan desoxigenación del agua, por lo que este proceso afecta el requerimiento de O₂ de los organismos acuáticos (Mayta y Mayta, 2017).

De acuerdo con Sancha (2013) la DQO del agua es superior a la DBO, debido a que es mayor el número de compuestos que pueden oxidarse por vía química, que por vía biológica. Dado que la DBO es la fracción biodegradable de la DQO siempre será DQO>DBO. Considerando lo anterior los valores de DQO obtenidos indican que la mayoría de las sustancias presentes en las pozas son de origen inorgánico y la MO orgánica de tipo oxidable prácticamente está ausente al haber registrado una concentración máxima de 55.1 mg O₂/L, en Pozas Rojas y en temporada de estiaje. El acuífero es muy vulnerable a la contaminación, especialmente en el área donde afloran las calizas que alimentan a las “pozas”. Estas rocas no tienen capacidad para atenuar diferentes contaminantes, por el tamaño de sus oquedades y fracturas, entre otras características. La parte granular del acuífero es menos vulnerable, porque tiene la capacidad para adsorber, eliminar y retener contaminantes; sin embargo, también ésta es limitada porque los niveles freáticos son someros en los valles (CONAGUA, 2020).

Por lo que, la recarga natural del acuífero ocurre por infiltración de la lluvia en los afloramientos de calizas y de los escurrimientos superficiales a lo largo de los arroyos. La principal zona receptora de



recarga es la sierra de San Marcos y Pinos (figura 27), estructura anticlinal muy alargada y de gran extensión superficial, donde afloran las calizas arrecifales, que son las rocas de mayor capacidad de infiltración (CONAGUA, 2020). La solubilidad de los gases generalmente disminuye con el aumento de temperatura y salinidad (Alvarez-Borrego, 2007); en este sentido y de acuerdo con CONAGUA (2020) en el VCC las aguas marinas, que originalmente saturaban las rocas sumergidas, fueron drenadas por gravedad y desplazadas por el agua dulce infiltrada, producto de las lluvias, hacia el mar. Por ello, actualmente, no hay posibilidad de que exista un mar antiguo en el subsuelo de la zona de Cuatro Ciénegas o de las zonas adyacentes ya que la salinidad del agua varía entre 730 y más de 5,300 miligramos por litro, con similar distribución relativa, esto es, se trata de agua dulce o salobre. Dado que la salinidad media del agua marina es del orden de 35,000 miligramos por litro, este resultado desecha la posibilidad de que el agua que brota en las “pozas” proceda de un mar antiguo. Lo anterior fortalece la comprensión del comportamiento entre la DBO y la DQO en la que se observa una diferencia importante entre la presencia de material orgánico e inorgánico, predominado este último.



Figura 10. [Fotografía de Irene Castillo]. (Cuatro Ciénegas, 2019). Presencia antropogénica dentro del sistema El Churince.

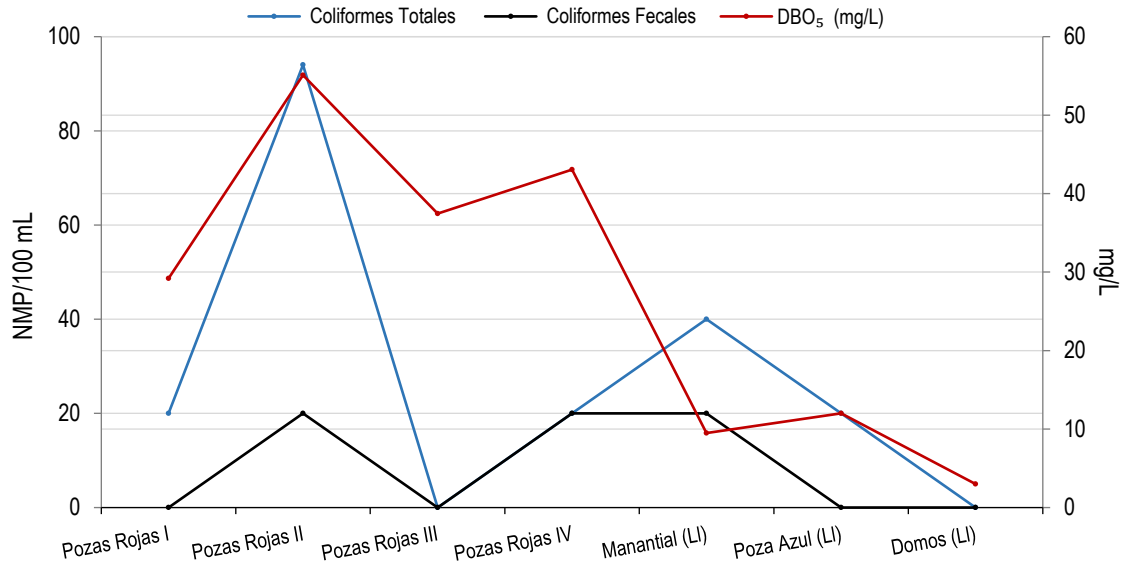


Figura 11. Relación DBO₅, coliformes totales y fecales de siete pozas del VCC.

Los coliformes fecales son organismos indicadores utilizados para controlar la calidad del agua. El ciclo de vida de estas bacterias implica una transición entre dos ambientes distintos. Considerando que el hábitat primario es el tracto gastrointestinal de los mamíferos, mientras que el suelo, el agua y los sedimentos representan el hábitat secundario (Anderson *et al.*, 2005; Gordon *et al.*, 2002). Por lo anterior se realizó el análisis de organismos totales y fecales en siete pozas del VCC. En la época de estiaje en los cuatro sitios del sistema Pozas Rojas se obtuvieron desde organismos coliformes totales ausentes hasta 94 NMP/100 mL, asimismo, los organismos coliformes fecales estuvieron ausentes y hasta 20 NMP/100 mL. En la temporada de lluvia tanto en Poza Azul como en Los Domos hubo ausencia de coliformes fecales y hasta 20 NMP/100mL de coliformes totales, en El Manantial 20 NMP/100 mL de coliformes fecales y 40 NPM/100 mL de coliformes totales. Debido a que la DBO₅ es el método utilizado para medir la cantidad de oxígeno que consumen los microorganismos (figura 9), en el sistema Pozas Rojas el nivel de oxígeno fue suficiente para oxidar la MO a diferencia de Los Domos donde hubo ausencia de organismos coliformes debido al bajo contenido en DBO₅ por lo que se plantea la presencia de bacterias de tipo anaerobio.

De acuerdo con lo anterior, es importante señalar que esta prueba es relevante para determinar la calidad microbiológica del agua y su relación con la intervención antrópica y el riesgo sanitario del sistema. Cabe señalar que en las siete pozas analizadas la fuente de contaminación se puede atribuir a las heces de la fauna de la zona (figura 8), suelo o sedimento que es transportado por el viento, es decir que los organismos coliformes encontrados son de origen natural. Ramos-Ortega *et al.* (2008) mencionan que las bacterias coliformes de origen animal están estrechamente relacionadas con el suelo, el agua y el tracto intestinal de los animales, se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo por lo que la contaminación fecal ha sido y sigue siendo el principal riesgo sanitario en el agua superficial, ya que supone la incorporación de microorganismos patógenos a esta. Los sitios estudiados, se encuentran dentro del LMP establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996 que es de 1000 NMP/100 mL.

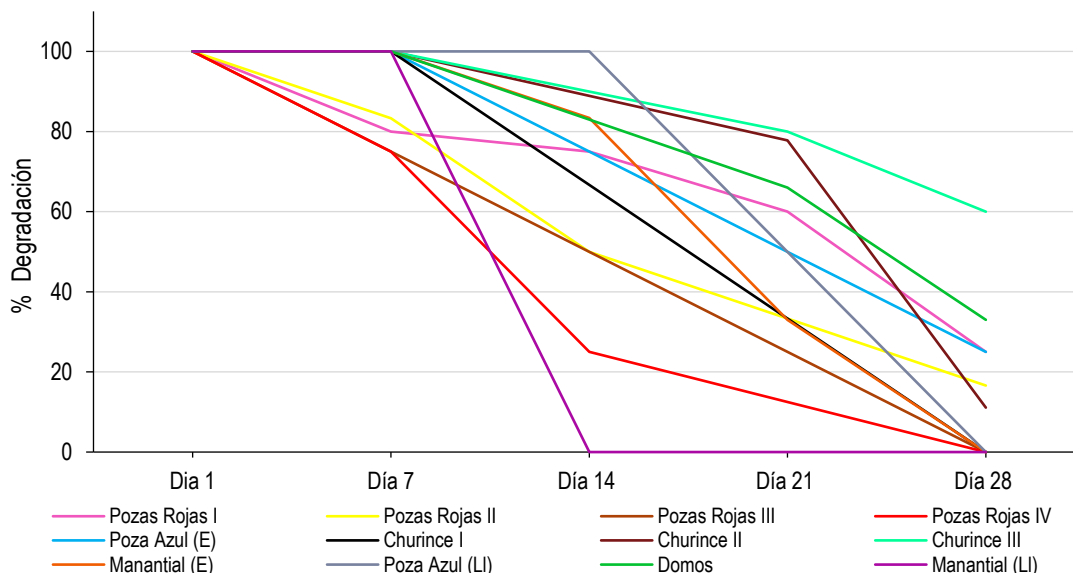


Figura 12. Biodegradabilidad: Pérdida de Oxígeno.

La biodegradabilidad es un parámetro esencial para conocer el riesgo que representa la dispersión de las sustancias en el medio ambiente (Martínez, 2007), siendo la capacidad de una sustancia de ser transformada en una estructura química más simple (compuesto orgánico + O₂) por vía microbiana (Vázquez y Beltrán, 2004), en el cual los microorganismos modifican dicha sustancia los cuales son excretados o reabsorbidos (CO₂ + H₂O + sales + biomasa) (Albarrán, 2010).

Para ello se realizó en época de estiaje un análisis de biodegradabilidad en las pozas del VCC. Los resultados indican que en los sitios Pozas Rojas III, IV, Churince I y El Manantial la MO que es incorporada a las pozas se degradada completamente, es importante mencionar que en los últimos dos sitios, aunque se realizó un pre-acondicionamiento del inóculo (figura 3, [anexo III-xvii](#)), la población de microorganismos inició el proceso de degradación a partir del día 7, esto debido a que no todos los microorganismos toleran de la misma manera un determinado cambio ambiental, generando situaciones de estrés que condiciona su aclimatación (Sánchez y Corrales, 2005); asimismo, la biodegradabilidad de MO provoca disminución en la cantidad de O₂ presente en el agua y que puede influir en su agotamiento, debido a que las bacterias aeróbicas utilizan la MO disuelta y suspendida como alimento y satisfacen sus requerimientos de energía con su oxidación a CO₂, utilizando el oxígeno disuelto del agua (Nuñez y O' Ryan, 2000; Movellán, 2004).

Debido a que la composición de la MO presente en el agua del Valle puede ser producto de fuentes alóctonas como también tener un origen autóctono, en los sitios Pozas Rojas I, II, Poza Azul, Churince II y III se degradó aproximadamente del 40 al 80% al día 28, sin embargo, la porción restante que no fue degradada al final de la prueba y de acuerdo con Rodríguez *et al.* (2000) no toda la MO presente en el agua puede ser consumida por las bacterias para su crecimiento; ya que la fracción de las sustancias húmicas y fúlvicas es difícilmente biodegradable por tratarse de macromoléculas poco aptas para ser usadas y solo una fracción pequeña es utilizada por los microorganismos.



En época de lluvia la MO que es arrastrada por la precipitación, incrementa su presencia en el sistema debido al transporte de sedimentos; por ello en El Manantial y Poza Azul la MO presente es fácilmente biodegradable (100%), en este último sitio, de acuerdo con la prueba de laboratorio la población bacteriana se estableció hasta el día 14 para llevar a cabo el proceso de biodegradación. En Los Domos el 33% de la MO presente en el sistema no se degradó durante los 28 días que duro la prueba, por lo que se requirió poca cantidad de oxígeno para llevar a cabo el proceso de degradación.

En los sistemas (figura 3 y 4) Pozas Rojas I, II, Poza Azul (E), Churince II y III, Los Domos (en ambas épocas) del total incorporado de MO (residuos vegetales y animales muertos) aproximadamente entre el 11 al 60% permanece en el agua, por lo que de acuerdo con Branco (1984) la población de microorganismos es abundante lo que influye en la disminución de la tasa de renovación de O₂, sin embargo, en un ambiente dado es proporcional a la cantidad de alimento orgánico biodegradable. Por otro lado, estos ciclos de sequía y lluvia pueden causar la exposición física de la materia orgánica que se encuentra protegida dentro de los agregados e incrementan la accesibilidad del sustrato para el ataque microbiano y enzimático, por lo que los nutrientes contenidos en ellos pueden ser rápidamente mineralizados. Asimismo, la producción enzimática y, por tanto, el reciclado de nutrientes se ven limitados por la disponibilidad de agua (Montiel, 2011).



Figura 13. Vegetación presente en el VCC. a) *Dasyliion* spp., b) *Prosopis* spp., c) *Haploesthes* spp., d) *Schoenoplectus* spp.

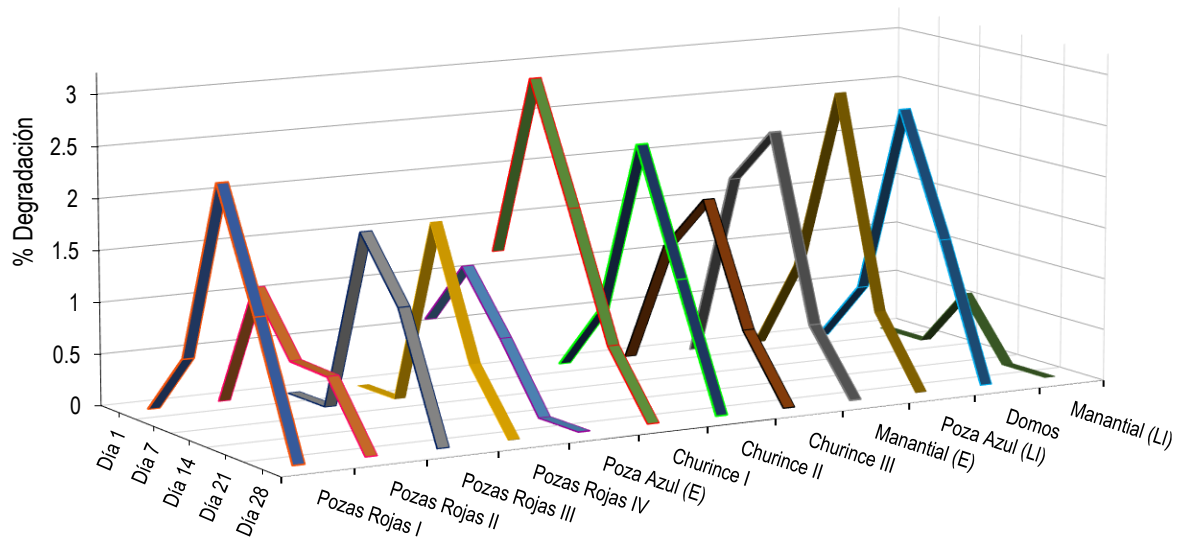


Figura 14. Biodegradabilidad: Producción de CO₂ en época de estiaje y lluvia.

La evolución de la formación de CO₂ es un proceso relacionado con la descomposición de la materia orgánica, representa la estimación de la actividad microbiana ya que durante las etapas iniciales de la descomposición hay un aumento en la emisión de CO₂ (Guerrero-Ortiz *et al.*, 2012).

En las pozas, Poza Azul y Churince I en la época de estiaje, al día 1 de la prueba se detectó la formación de CO₂ en un porcentaje de 0.59 y 1.19 respectivamente, en Pozas Rojas (PR) II y Churince I se generó 1.22 y 2.99% de CO₂ al día 7 de la prueba, en tanto que al día 14 PR I, El Churince II, y El Manantial en época de estiaje generaron 2.39% de CO₂ cada una. Sin embargo, es importante mencionar que, durante la estación seca, disminuye la descomposición de la materia orgánica y se asocia con una etapa de acumulación de nutrientes potencialmente solubles, si se toma en cuenta que la producción de CO₂ se presenta en mayor proporción en sistemas donde hay aporte MO. Cabe destacar que el contenido de MO en las pozas del VCC es escaso, lo que supone poca producción de CO₂ en los sistemas, debido a que la MO presente está en forma soluble (MOS), en consecuencia, la biodegradación o mineralización es considerada instantánea y completa (Montiel, 2011; Díaz, 2018). Es necesario subrayar que la prueba analítica de biodegradabilidad se realizó bajo condiciones controladas.

Los Domos en temporada de lluvia generaron 2.5% de CO₂ al día 14. En Poza azul se generó 2.72% de CO₂ en el mismo tiempo, la producción cesó al día 28. En El Manantial durante la temporada de lluvia el epilimnion registró 0.59% de CO₂ al cabo de 28 días de duración de la prueba. Con las primeras lluvias, el ingreso de agua al sistema y la solubilización de los nutrientes acumulados, permiten que se activen tanto organismos del suelo como plantas y esto se asocia con una etapa más dinámica del reciclaje de nutrientes. De forma indirecta, la disponibilidad de agua controla la actividad de los organismos del suelo, la cual puede determinar la dinámica de nutrientes en el ecosistema (Montiel, 2011).



En los ecosistemas estacionales como los desiertos, durante la época de lluvias se presentan periodos intercalados de lluvias y sequías, a estos periodos se les ha llamado pulsos de agua, en ellos se registra un rápido cambio en el potencial hídrico del suelo asociado a entrada de agua, puede causar que algunos microorganismos sensibles a cambios en potencial hídrico sufran “shock” osmótico, en donde las células microbianas son lisadas o hay liberación de solutos intracelulares. Estos solutos principalmente son polímeros ricos en nutrientes en formas orgánicas lábiles, fácilmente hidrolizables (tales como proteínas, ácidos nucleicos, aminoácidos, entre otros.) y pueden representar una parte del presupuesto inicial de C y nutrientes para la actividad microbiana del suelo (Montiel, 2011).

El agua presentó condiciones aeróbicas con valores próximos a la saturación debido al contacto con el aire y la actividad biológica, encontrándose elementos en sus formas más oxidadas: C como CO_2 , H_2CO_3^- y/o HCO_3^- , S como SO_4^{2-} entre otros. El CO_2 es un ácido débil de gran importancia en las aguas naturales, que proviene tanto del CO_2 atmosférico, como de la degradación microbiana de la materia orgánica a través de los procesos fotosintéticos (Mota, 2011; Barceló *et al.*, 2002). De acuerdo con FAO *et al.* (2011) se requiere de aceptores de electrones (CO_2 , SO_4^{2-} o NO_3^-) para la disposición de estos durante la degradación de la MO, en este sentido, cuando el CO_2 acepta los electrones liberados de la MO, se reducen a gas metano (CH_4). La presencia de SO_4^{2-} en este ambiente desvía parte de la MO hacia su reducción mediante bacterias reductoras (figura 23), lo que de igual forma explicaría el bajo contenido de CO_2 encontrado en las pozas.



Figura 15. Actividades ganaderas dentro del VCC.

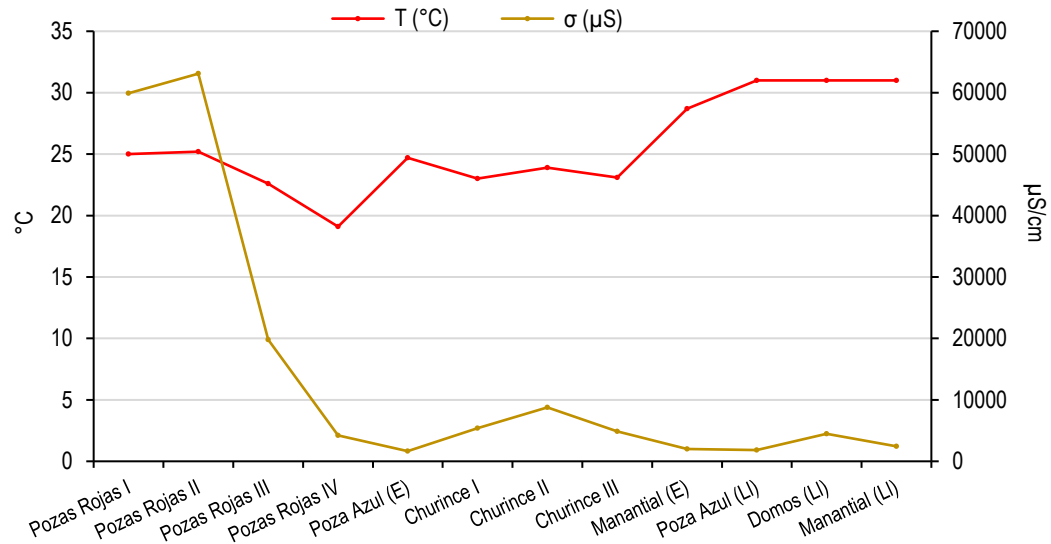


Figura 16. Relación CE y temperatura.

La conductividad del agua está relacionada con la concentración de sales en disolución, cuya disociación genera iones capaces de transportar corriente eléctrica. La solubilidad de las sales en el agua depende de la temperatura, por lo que la conductividad varía conforme la temperatura del agua (Solís-Castro *et al.*, 2017).

Tabla 7. Rangos de conductividad eléctrica en soluciones.

Solución	Rango
Agua pura	0.05 $\mu\text{S/cm}$
Agua desmineralizada	0.1 a 1.0 $\mu\text{S/cm}$
Agua destilada	1 a 10 $\mu\text{S/cm}$
Agua de grifo	100 a 1000 $\mu\text{S/cm}$
Agua contaminada	1000 a 10,000 $\mu\text{S/cm}$
Agua de mar	30,000 a 50,000 $\mu\text{S/cm}$
Solución de NaCl al 5%	70,000 $\mu\text{S/cm}$
Solución de H ₂ SO ₄ al 10%	140,000 $\mu\text{S/cm}$

Fuente: (Hach, 2008)

De acuerdo con APHA *et al.* (2017) la capacidad que tiene el agua para conducir una corriente eléctrica depende de la presencia de iones (concentración, movilidad y valencia) y su temperatura, por ello, la CE se ve influenciada por la temperatura ya que entre mayor sea esta, la capacidad de conducción de corriente eléctrica se incrementa. En este sentido, en época de estiaje Pozas Rojas IV y II registraron una temperatura de 19.1 y 25.2°C y una CE de 4,230 y 63,100 $\mu\text{S/cm}$, mientras que Poza Azul registró 24.7°C y 1,650 $\mu\text{S/cm}$ de CE, asimismo, en los sitios El Churince la temperatura osciló entre 23 y

23.9°C y en El Manantial se obtuvo una temperatura de 28.7°C y 2020 $\mu\text{S/cm}$ de CE. La temperatura del agua afectará a la conductividad eléctrica, de tal forma que su valor aumenta de 2 a 3% por cada grado Celsius de incremento (Sánchez *et al.*, 2007).

En época de lluvia Poza Azul, Los Domos y El Manantial registraron una temperatura de 31°C y una CE de 1820, 4460 y 2420 $\mu\text{S/cm}$. La conductividad de aguas naturales está mediatizada por el terreno que atraviesa y por la posibilidad de disolución de rocas y materiales, el tipo de sales presentes, el tiempo de disolución y toda la serie de factores que pueden afectar la solubilidad de un soluto en agua (Marín, 2019).

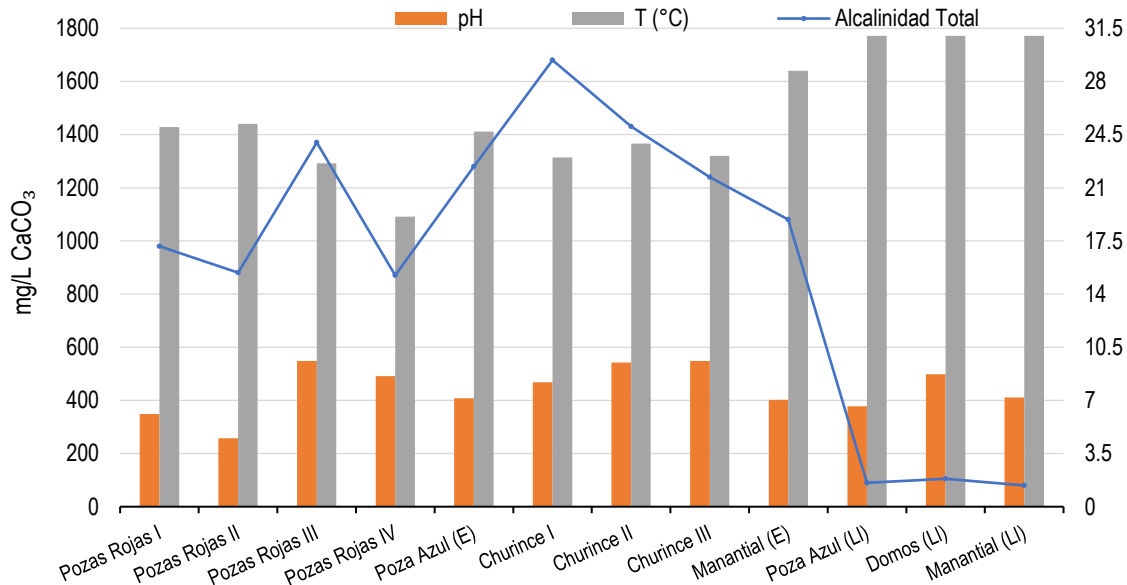


Figura 17. Relación pH, temperatura y alcalinidad total.

En la época de estiaje el sistema de Pozas Rojas registró pH de 4.5 a 9.6, temperaturas de 19.1 a 25.2°C y alcalinidad total entre 870 y 1370 mg/L CaCO₃, Poza Azul una temperatura de 24.7°C, alcalinidad total de 1280 mg CaCO₃ y pH de 7.14, en cuanto al sistema Churince, las tres pozas registraron temperatura entre 23 y 28.7°C, pH de 7.03 y 9.6 así como alcalinidad total de 1080 y 1680 mg/L CaCO₃. En época de lluvias Poza Azul, Domos y Manantial registraron temperatura de 31°C, con un pH de 6.62, 8.72 y 7.19 respectivamente, una alcalinidad total de 90, 105 y 80 mg/L CaCO₃. Es importante señalar que los sitios Poza Azul y Manantial registraron en ambas temporadas un pH neutro (7.0-7.1).

De acuerdo con Minckley (1969) en el lado sureste del sistema Churince se encuentra una parte seca del lago, sobre las cuales existen pirámides de rocas calizas porosas. Estas estructuras son restos de dunas de yeso consolidadas que contribuyen a la alcalinidad del sistema por encima de los 1080 mg CaCO₃ y hasta los 1680 mg/L CaCO₃ donde este último corresponde a la poza Churince I que se localiza en el punto más cercano a las llamadas "Dunas de yeso". Cabe destacar que existe una diferencia entre temporadas en las pozas, ya que el VCC está constituido por rocas sedimentarias que aportan calcita y suelos Gípsicos que por su naturaleza aportan Ca²⁺ (CO₃²⁻ y HCO₃⁻) y Mg²⁺. La alcalinidad en época de estiaje es alta comparada con la que se registra en época de lluvias ya que al aumentar el volumen de agua y la profundidad en las pozas los carbonatos disponibles se disuelven por la presencia de CO₂, por lo que la alcalinidad de esta temporada disminuye.

El aumento de pH en el agua de Pozas Rojas III, Churince II y III de acuerdo con Nieto (2015) se debe a la baja concentración de CO₂ libre, ocasionando una disminución en la concentración de H⁺ que al disminuir la temperatura se observa una menor descomposición de moléculas de agua. En Pozas Rojas II y de acuerdo con Grijalbo (2016) la acidez del agua puede deberse a la presencia de H₂SO₄ procedente de los ácidos húmicos disueltos de los restos orgánicos del suelo.

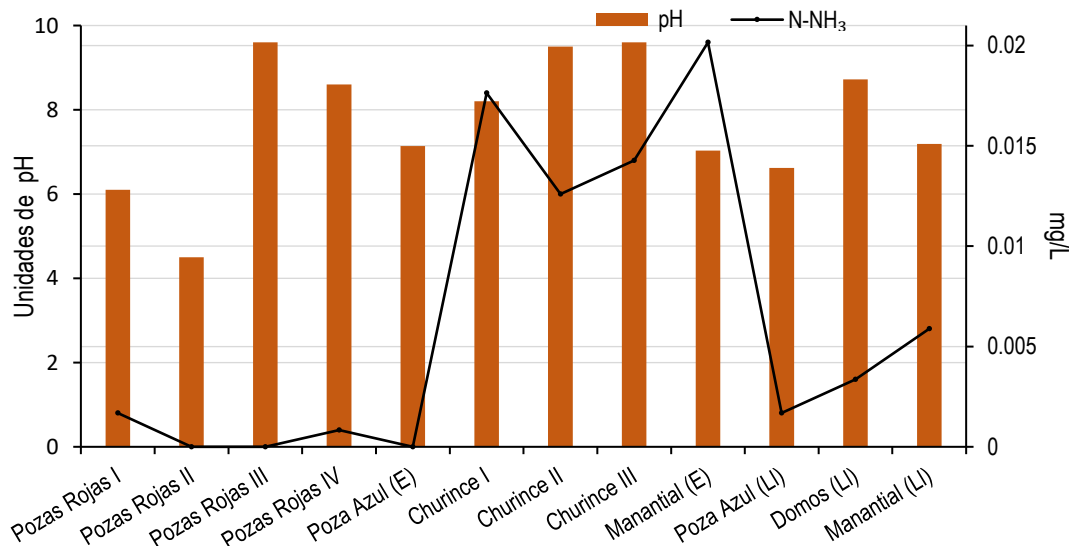


Figura 18. Relación N-NH₃ y pH.

La fuente de nitrógeno amoniacal en aguas superficiales es resultado de la degradación natural de la materia orgánica presente en la naturaleza. Es uno de los componentes transitorios en el agua, porque es parte del ciclo del nitrógeno, y se ve influido por la actividad biológica (González, 2013).

De acuerdo a Cid (2014) una solución que contenga iones amonio y amoniaco dependiera principalmente del pH. Si el pH es alto, dominaran los grupos OH⁻ y por tanto la especie predominante será el amoniaco (NH₃). Mientras el pH es bajo dominarán los grupos H⁺ y la especie predominante será el ión amonio (NH₄⁺). Es así que la suma de las concentraciones de amonio y amoniaco se le conoce como nitrógeno amoniacal (N-NH₃). Por otra parte, el N orgánico es reconvertido en NH₄⁺ principalmente por procesos bacterianos. Las bacterias pueden encontrarse flotando en la columna de agua, o adheridas a la MO o inorgánica suspendida. Si la MO a la que están adheridas las bacterias contiene más N o P del que requieren, el exceso es liberado en forma de amonio o iones fosfato. Cuando el alimento se agota las bacterias mueren y se descomponen rápidamente aportando amonio y fosfato al medio (Movellán, 2004). Considerando lo anterior, los resultados indican que para la época de estiaje Pozas Rojas II y III así como Poza Azul no se detectó N-NH₃ con pH de 4.6, 9.6 y 7.14 respectivamente. Por otro lado, en época de lluvias los resultados oscilaron entre los 0.00168 y 0.00336 mg/L de N-NH₃ con pH de 6.62 a 8.72. Cabe destacar que las pozas que registraron pH de 7.0 y 7.1 la mayor parte del amoniaco se encuentra disociado en forma iónica.

Como se indicó anteriormente (figura 7), la presencia de organismos acuáticos en el sistema Pozas Rojas está limitado por el consumo acelerado de O₂ y como menciona Perdomo y Barbazán (s.f.) las principales formas de nitrógeno (NH₃, NO₃⁻, NO₂⁻, N₂O) son aportadas por las precipitaciones, en este sentido al encontrarse el N-NH₃ en solución acuosa la concentración de este mismo se ve reducida. La presencia de N-NH₃ en altas concentraciones indica posible contaminación; cuando el pH aumenta, el NH₄⁺ se convierte en NH₃, y su toxicidad aumenta (SWRCB, 2010). Como se puede observar los valores obtenidos y de acuerdo con la Ley Federal de Derechos (2019) se encuentran dentro del LMP establecido de 0.06 mg/L.

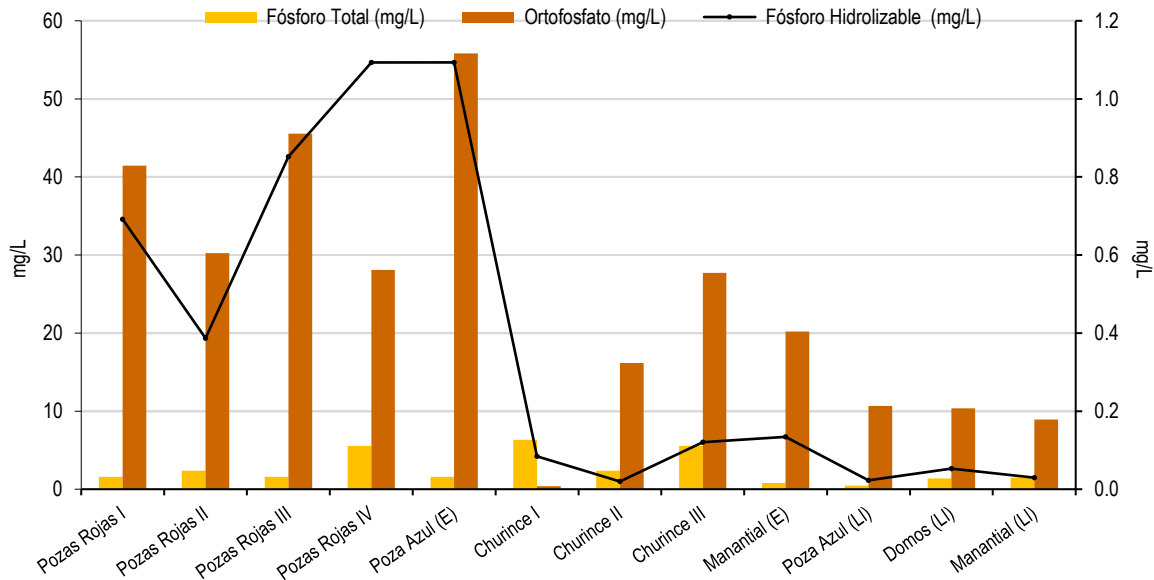


Figura 19. Relación Ortofosfato, P hidrolizable y P total.

El fósforo (P) se produce en aguas naturales exclusivamente como fosfatos, clasificándose como ortofosfatos, fosfatos condensados (piro, meta y otras polifosfatos) y fosfatos orgánicos producidos en solución, partículas, desechos de los organismos acuáticos; esenciales para su crecimiento, además es un nutriente limitante de la productividad primaria del agua (APHA *et al.*, 2017).

En el VCC, el agua subterránea sube a la superficie a través de la disolución de la piedra caliza, lo que da como resultado un " archipiélago " de más de 300 pozas rodeadas de suelos salinos ricos en sulfatos de calcio y extremadamente pobres en nutrientes (ultra oligotróficos), en particular fósforo (P). La cobertura vegetal y la disponibilidad de agua en estos suelos dependen del grado de proximidad a los sistemas acuáticos y las precipitaciones (López-Lozano *et al.*, 2012). Por lo anterior se realizó un estudio en la época de estiaje en el sistema Pozas Rojas donde el contenido de P total se encontró en intervalos de 0.03-0.1 mg/L, 0.56-0.91 mg/L de ortofosfatos y 19.3-54.7 mg/L de P hidrolizable. En el sistema Poza Azul el contenido de P total fue de 0.03 mg/L, 1.1 de ortofosfato y 54.7 mg/L de P hidrolizable; en El Churince los intervalos de P total, ortofosfatos y P hidrolizable fueron de 0.05-0.13 mg/L, 0.01-0.55 mg/L y 1.0- 6.0 mg/L respectivamente; 0.02 mg/L de P total, 0.4 mg/L de ortofosfatos y 6.7 mg/L de P hidrolizable en El Manantial.

Asimismo, en época de lluvia Poza azul registró una concentración de 0.01 mg/L de P total, en tanto que en Los Domos y Poza Azul se obtuvieron 0.21 mg/L de ortofosfatos y 1.12 mg/L de P hidrolizable; El Manantial y Los Domos registraron 0.03 mg/L de P total, solamente El Manantial registró 0.18 mg/L de ortofosfatos y 1.48 mg/L de P hidrolizable y Los Domos una concentración de 2.64 mg/L de P hidrolizable. Es importante aclarar que debido a que el arsénico se encuentra presente en la zona por origen geológico, se considera una interferencia para la cuantificación de P, por ello se eliminó al realizar el proceso analítico de hidrolisis, quedando reducido a arsenito.

La principal fuente de P es la mineralización de la apatita, que se encuentra en las rocas que forman los suelos (Daza *et al.*, 2006), dado que la alcalinidad del agua está determinada por el contenido de CO_3^{2-} , HCO_3^- e OH^- (figura 15), no obstante, de estar presentes los fosfatos pueden contribuir con la



alcalinidad. De acuerdo con Sanchez (2001) y Solano (2005) las fuentes de P en agua, es debido a la forma alóctona procedente de depósitos, rocas fosfóricas, lavados de tierra y fertilizantes desprendidos en forma de ortofosfato, mediante erosión. Este tipo de P es utilizado por plantas, bacterias y algas, el P inorgánico se presenta en bajas concentraciones en las pozas del VCC debido a que su reactividad permite formar compuestos insolubles que precipitan en el sedimento. Por la capacidad del ácido fosfórico de perder tres H^+ por hidrólisis, en función del pH, permite obtener diferentes especies intermedias $H_2PO_4^-$ ($2.1 < pH < 7.2$) y HPO_4^{2-} ($7.2 < pH < 12.3$) hasta llegar a la forma desprotonada PO_4^{3-} ($pH > 12.3$) (Palacios, 2012).

Al considerarse como limitante en aguas superficiales, el P puede encontrarse en moléculas de mayor tamaño como fosfatos condensados u orgánicos (HACH, 2020), los cuales son generados por la biota presente en el medio. Los sistemas Pozas Rojas y Poza Azul registraron altas concentraciones de P hidrolizable y de acuerdo con Tapia-Torres y García-Oliva (2013) los residuos orgánicos de plantas (figura 13), animales y biomasa microbiana muerta contienen compuestos de fósforo orgánico que pueden ser hidrolizados y mineralizados por acción de enzimas de origen microbiano y vegetal. Se llevan a cabo diferentes procesos del ciclo del P en aguas naturales; (1) el fitoplancton incorpora a sus células P disuelto y la actividad bacteriana remineraliza el P orgánico a ortofosfato el cual es devuelto a la capa eufótica por mezcla vertical, (2) ocurre en la capa eufótica, donde el zooplancton consume al fitoplancton y remineraliza ortofostato con la ayuda de las bacterias intestinales y (3) cuando el fitoplancton y las bacterias mueren, el P orgánico de sus tejidos se convierte rápidamente a fosfato por medio de las fosfatasa en las células. La mayor parte del fitoplancton es consumido por animales, así estos obtienen el P que requieren. El material no asimilado se pierde en las heces fecales que contienen cantidades apreciables de fosfatos orgánicos además de ortofosfatos. La hidrólisis de estos materiales se alcanza rápidamente gracias a la acción de fosforilasas que también están presentes, con lo que el P inorgánico pasa rápidamente al agua junto con otros compuestos orgánicos fosfatados no descompuestos (Movellán, 2004).



Figura 20. *Desierto Chihuahuense, fauna presente en el sistema El Churince.*

Daza *et al.* (2006) mencionan que la baja disponibilidad de P está asociada con el bajo contenido de P total, la alta estabilidad de los compuestos fosfatados del suelo implica baja solubilidad y, por tanto, débil liberación de formas disponibles y baja intensidad de mineralización de compuestos orgánicos fosfatados. Los sitios Pozas Rojas IV, Churince I y III se encuentran fuera del LMP establecido por la Ley Federal de Derechos (2019) para P total de 0.05 mg/L ya que ocurre lo contrario a lo mencionado por Daza *et al.* (2006) en el sistema de pozas del VCC.

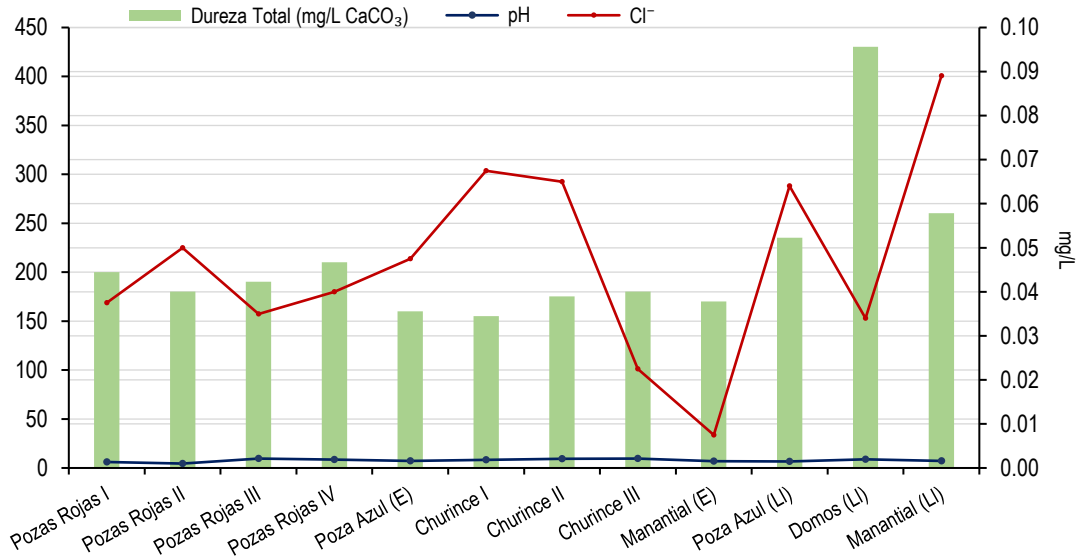


Figura 21. Relación Cl⁻, dureza total y pH.

La dureza es causada por iones metálicos divalentes que pueden ser Ca²⁺, Mg²⁺, Sr²⁺, Fe²⁺ y aniones como HCO₃⁻, SO₄²⁻, NO⁻³, SiO₃²⁻ y Cl⁻ (Soto, 2010). De manera que, los resultados obtenidos del análisis de las pozas en época de estiaje variaron entre 155.1-210.2 mg/L CaCO₃ con lo cual y de acuerdo con Roldán y Ramírez (2008) en esta temporada se pueden clasificar como aguas duras (tabla 8); en época de lluvias el agua de los sitios muestreados se caracterizó por presentar valores de dureza entre 235.2-430.4 mg/L CaCO₃ clasificandolas como aguas duras a muy duras, dado que las aguas con dureza elevada son generalmente alcalinas (pH alto), siendo así que el rango de pH encontrado fue de 4.5-9.6; cabe destacar que Pozas Rojas II (E) registró un pH ácido (4.5), clasificando el agua como dura (180.1 mg/L CaCO₃) y 0.050 mg/L Cl⁻.

Por lo anterior, el ion Cl⁻ es uno de los aniones inorgánicos que está presente en las aguas naturales (Martínez *et al.*, 2006). Los resultados indicaron que la concentración de Cl⁻ varía entre 0.007-0.067 mg/L en época de estiaje, mientras que en época de lluvias la concentración varió entre 0.034-0.089 mg/L Cl⁻ debido a que las aguas duras se originan en áreas donde hay formación de roca caliza y puesto que no es carbonato puro las impurezas que contiene son disueltas y pasan a formar parte de los componentes del agua.

Tabla 8. Clasificación del agua de acuerdo con la dureza.

mg CaCO ₃ L ⁻¹	Grado de dureza
0 - 75	Blanda
75 - 150	Moderadamente dura
150 - 300	Dura
>300	Muy dura

Recuperado de Roldán y Ramírez (2008).

De acuerdo con el análisis de resultados el aumento en la dureza del agua en época de lluvia se debe a que el CaCO₃ no se diluye fácilmente en el agua, de acuerdo con Díaz (2018) cuando el agua de lluvia cae disuelve el CO₂ del aire formando H₂CO₃⁻ pasando por la roca caliza y reacciona dando lugar a HCO₃⁻ que es soluble en H₂O; de esta forma

el agua de lluvia recoge Ca²⁺ y HCO₃⁻ volviéndose dura. Así mismo, el incremento en la concentración de cloruros es resultado de la disolución de suelo y roca que lo contienen que al entrar en contacto con la precipitación se lava depositándose en el sistema.

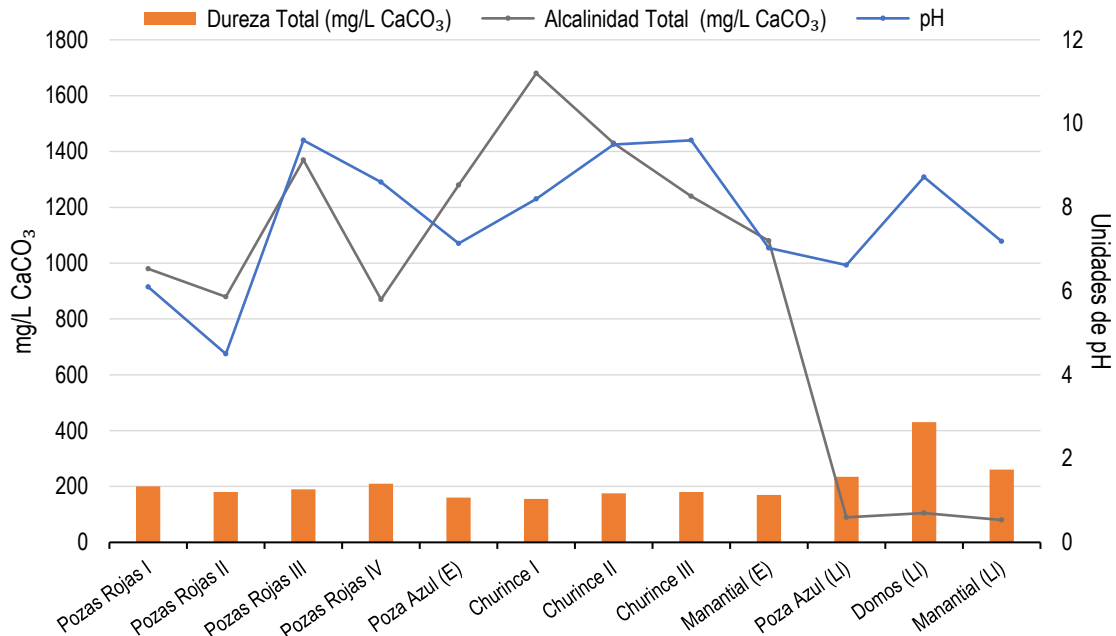


Figura 22. Relación dureza total, alcalinidad total y pH.

Las fuentes naturales principales de la dureza del agua provienen del suelo y son las rocas sedimentarias, percolaciones y escorrentías. El agua dura normalmente se origina en áreas donde la capa superior del suelo es gruesa y existen formaciones calcáreas (Neira, 2006). Las aguas que contienen mayor cantidad de bicarbonatos de calcio y de magnesio, representa la principal forma de alcalinidad, y en algunos casos, es equivalente a la dureza total (Soto, 2010).

De esta manera los resultados obtenidos en los tres sistemas para la época de estiaje indican que, en Pozas rojas el agua del sistema es dura ya que oscila entre los 180.1-210.2 mg/L CaCO₃, con alcalinidad de 870-1370 mg/L CaCO₃ y niveles de pH de 4.5-9.6; por otra parte, en Poza Azul se obtuvieron 1280 y 160.1 mg/L CaCO₃ de alcalinidad y dureza respectivamente. En el sistema Churince se observó una disminución gradual en la alcalinidad de las cuatro pozas desde El Churince I-III hasta El Manantial (1680-1080 mg/L CaCO₃) debido a que en estos sistemas existen estructuras de yeso consolidadas (Minckley, 1969) y realizan un aporte importante que a lo largo de las pozas se va reduciendo la concentración de estas sales; en las cuatro pozas se presentó agua dura (155.1-180.1 mg/L CaCO₃) y pH 7.0-9.6.

Sin embargo, los resultados obtenidos en época de lluvias para los sistemas Poza Azul, Los Domos y El Manantial señalan un aumento en la dureza del agua respecto de la época de estiaje, en el cual Los Domos presentan aguas muy duras (430.4 mg/L CaCO₃), el aumento de la dureza se puede atribuir al lavado de las rocas sedimentarias (caliza y yeso) (Neira, 2006) presentes en la zona, contribuyendo al aumento de este y a su vez la disminución de la alcalinidad por la dilución del CO₃²⁻ por lo que el pH de las pozas osciló entre 6.6-8.7 aumentando la concentración de CO₂ libre en el agua.



El análisis de resultados indica que el agua de las pozas del VCC posee una capacidad amortiguadora alta, ya que la mayor parte del CO_2 disuelto está como CO_2 rodeado de moléculas de agua ($\text{CO}_{2(g)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)}$) y otra parte está en forma de $\text{H}_2\text{CO}_{3(aq)}$ asumiendo que está presente como gas disuelto el $\text{CO}_{2(aq)}$; una vez formado el H_2CO_3 se disocia para dar bicarbonato y protones ($\text{HCO}_3^- + \text{H}^+$). Cabe destacar que la fuente mayoritaria de HCO_3^- no es el proceso descrito anteriormente, sino que los CO_3^{2-} provienen del lavado de las rocas calizas que al contacto con el agua ($\text{CO}_3^{2-} + \text{H}_2\text{O}$) forma HCO_3^- , aumentando de forma natural el pH del agua, ya que la hidroliza parcialmente formando OH^- ($\text{HCO}_3^- + \text{OH}^-$). Debido a este proceso el pH del agua en temporada de lluvia no registra grandes variaciones por lo que la alcalinidad debida a los HCO_3^- se mantiene ya que existe una relación directa entre el H_2CO_3 y los CO_3^{2-} y las diferentes reacciones de equilibrio químico conducen a su formación.

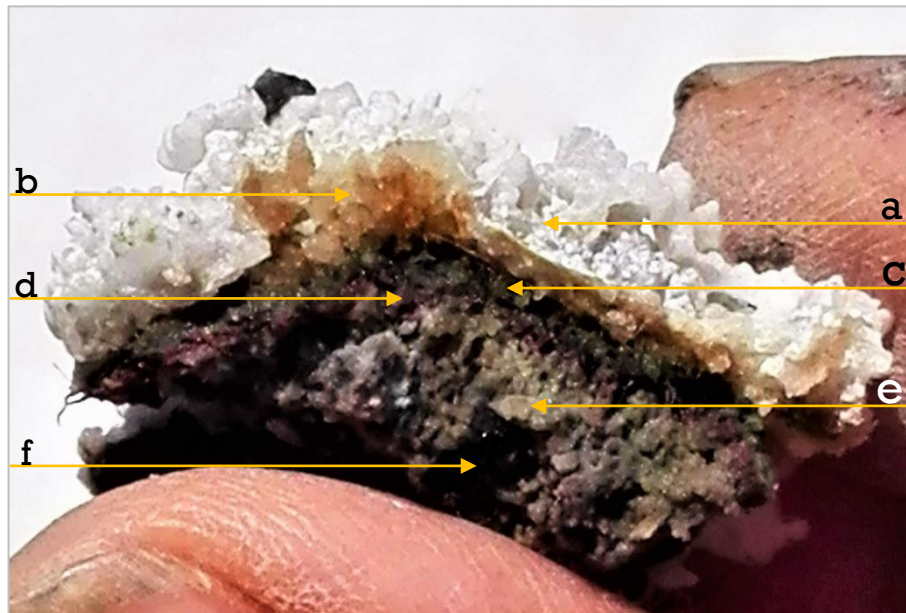


Figura 23. Los Domos. Tapete microbiano: a) Sales minerales, b) Diatomeas, c) Cianobacterias, d) Bacterias Purpuras Fotosintéticas, e) Bacterias Anoxigénicas del Azufre, f) Bacterias Metanógenas. Eguiarte, L.E. (comunicación personal, 21 marzo 2019).

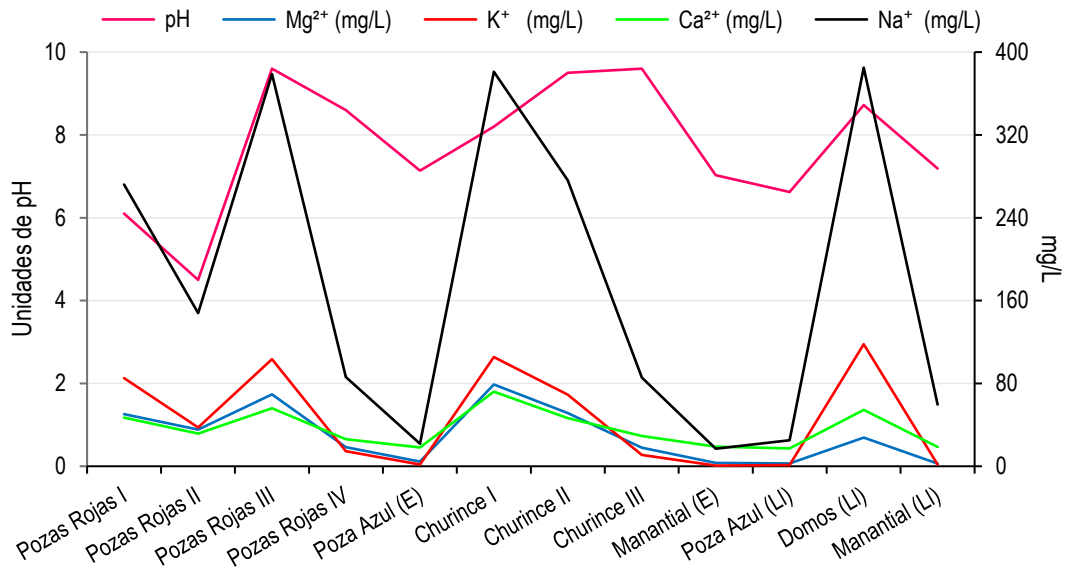


Figura 24. Relación pH y Cationes (K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺).

El pH regula el grado de retención de numerosos nutrientes solubles sobre las superficies coloidales mientras que el potencial de oxido-reducción determina la disponibilidad de diversos nutrimentos. En el mar, el efecto buffer se debe a la presencia de cationes como Ca²⁺, Na⁺, K⁺, Mg²⁺ (Anaya, 2003).

Tabla 9. Datos de pH y Cationes (K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) en época de estiaje y lluvia.

	Sitio	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	pH
Estiaje	Pozas Rojas I	272.1	85.1	50.3	46.9	6.1
	Pozas Rojas II	148.1	37.4	35.3	31.6	4.5
	Pozas Rojas III	378.7	103.5	69.5	56.1	9.6
	Pozas Rojas IV	86.1	14.6	18.3	26.1	8.6
	Pozas Azules (E)	21.9	1.8	4.5	18.1	7.14
	Churince I	381.1	105.5	79.0	72.1	8.2
	Churince II	276.3	69.2	51.3	46.6	9.5
	Churince III	85.7	11.0	17.9	29.2	9.6
	Manantial (E)	16.9	0.7	3.3	19.0	7.03
Lluvia	Pozas Azules (LI)	25.0	1.2	2.7	17.2	6.62
	Domos (LI)	385.0	117.9	27.6	54.6	8.72
	Manantial (LI)	59.6	1.8	2.6	18.6	7.19

Puesto que el Na⁺ es el catión dominante en las pozas del VCC de acuerdo con Beita-Sandí y Barahona-Palomo (2010) la acumulación del sodio en el suelo tiene dos efectos principales; (1) si es absorbido como ion, al acumularse es tóxico para las plantas, (2) si es absorbido por arcillas, sustituye al calcio y magnesio, lo que provoca cambios en la estructura afectando la permeabilidad del suelo y el crecimiento de las plantas. El peligro de sodificación depende de la concentración de los cationes en el agua, de los cuales los principales son calcio, magnesio y sodio. En el entorno de las pozas estudiadas la vegetación representativa es matorral desértico rosetófilo, microfila y de transición, mezquites, pastizal halófilo, plantas gipsófilas y vegetación acuática y semiacuática.

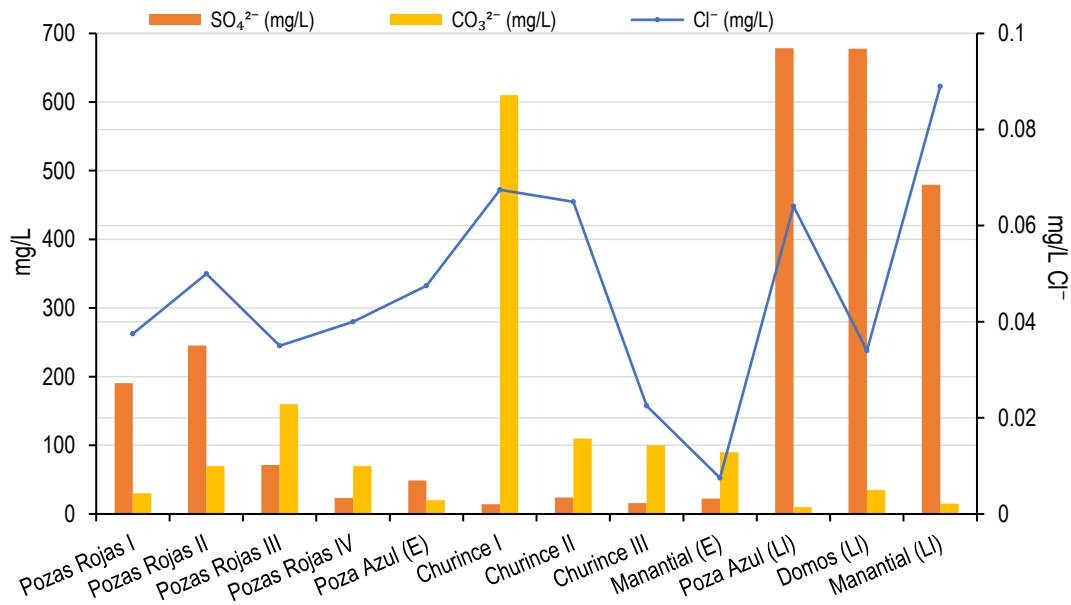


Figura 25. Relación SO_4^{2-} , CO_3^{2-} y Cl^- .

Las rocas que se encuentran en contacto con el agua determinan la naturaleza y la concentración de iones metálicos en ella (Manahan, 2007). Los aniones más importantes en las aguas naturales son CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} y NO_3^- encontrándose en combinación con cationes como Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Fe^{2+} , formando sales ionizables (Roldán y Ramírez, 2008).

De acuerdo con la composición mineralógica de la zona, los tipos de suelo Xerosol, Lúvico, Regosol predominando Solonchak y Gypsico, aportan sales a los cuerpos de agua (tabla 1). El contenido de CO_3^{2-} en las pozas del VCC en época de estiaje fue de 20-610 mg/L; la concentración de SO_4^{2-} registró intervalos de 14.4-245.4 mg/L, cabe destacar que el sistema Churince presentó las concentraciones más bajas para este ion; el ion Cl^- fue de 0.007-0.067 mg/L de manera que, y al igual que otras sales, el periodo seco se caracteriza porque la evapotranspiración es mayor que la precipitación formando una costra de sales en la superficie del suelo, lo que no permite el lavado de sales desde las capas superficiales (Hervé *et al.*, 2002). A diferencia de los resultados obtenidos en la época de lluvias, estos varían ya que las sales acumuladas en las capas superficiales del suelo han sido lavadas, transformadas y disueltas, de manera que los valores encontrados para SO_4^{2-} fueron mayores y estuvieron comprendidos de los 678.5 y 479.7 mg/L, asimismo el ion Cl^- se mostró en intervalos de 0.064 y 0.089 mg/L para Poza Azul y Manantial respectivamente. En contraste con las concentraciones de CO_3^{2-} , que fueron menores para Poza Azul y Manantial (10 y 15 mg/L respectivamente) esto se debe a la transformación de bicarbonatos que sufre el CO_3^{2-} . Por otra parte, los Domos registró 677.8 mg/L en contenido de SO_4^{2-} , 35 mg/L de CO_3^{2-} y 0.034 mg/L de Cl^- .

Los aniones SO_4^{2-} , CO_3^{2-} y Cl^- entran al agua por escurrimiento durante la época de precipitación, de acuerdo con el análisis de resultados el aumento de SO_4^{2-} y Cl^- en temporada de lluvia sugiere que es provocado por el arrastre y disolución de rocas ígneas intrusivas y sedimentarias provenientes de la Sierra San Marcos (figura 27). Asimismo, el aumento de CO_3^{2-} no es tan marcado ya que cuando se hidroliza supone un aporte de bicarbonato y OH^- al agua.

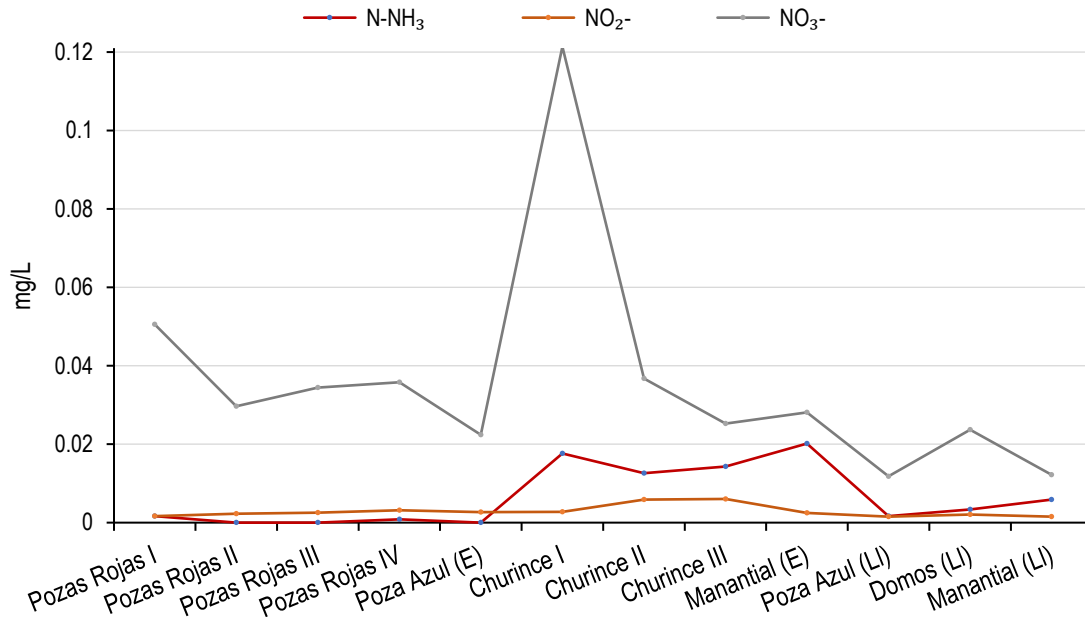


Figura 26. Relación N-NH₃, NO₂⁻ y NO₃⁻.

Los niveles de oxido-reducción de las formas químicas del nitrógeno en el agua, son determinados esencialmente por la introducción de oxígeno en los cuerpos de agua subterránea ocasionada por la circulación y por el consumo de oxígeno debido a la descomposición de materia orgánica (Pacheco *et al.*, 2002).

Los resultados en época de estiaje para Pozas Rojas II y III son de N.D. mg/L N-NH₃, NO₂⁻ de 0.0022 y 0.0025 mg/L, NO₃⁻ de 0.0297 y 0.0344 respectivamente. En Poza Azul de N.D. mg/L N-NH₃, 0.0027 mg/L NO₂⁻ y 0.0224 mg/L NO₃⁻, cabe destacar que los resultados anteriores no indican la ausencia de N-NH₃ sino la transformación a productos intermedios (nitritos y nitratos) por oxidación-reducción. En el sistema El Churince los valores obtenidos de N-NH₃ oscilaron entre 0.0176-0.0201 mg/L, NO₂⁻ 0.0028-0.0025 mg/L y NO₃⁻ de 0.1214-0.0281 mg/L para la misma época.

Por otra parte, en época de lluvias es importante señalar que hubo una reducción considerable de N-NH₃ en El Manantial (0.0058 mg/L) y se detectó en baja cantidad en Poza Azul (0.0016 mg/L), de modo similar se redujeron los aportes de NO₂⁻ y NO₃⁻ en El Manantial y Poza Azul; en Los Domos se obtuvo 0.0033, 0.0021 y 0.0237 mg/L de N-NH₃, NO₂⁻ y NO₃⁻ respectivamente. En ninguna de las pozas se registró alta concentración de MO lo que favorece la escasa presencia de las diferentes formas químicas del Nitrógeno.

El N-NH₃ es el producto final de la reducción de sustancias orgánicas o inorgánicas nitrogenadas que naturalmente se incorporan al agua superficial o subterránea, dado que la presencia de amonio favorece la multiplicación bacteriana, como resultado de su reducción. En el proceso de oxidación del N-NH₃ a NO₂⁻ esta forma toxica del nitrógeno puede estar presente en el agua. Los nitratos también pueden estar presentes en las aguas superficiales y subterráneas como resultado de la disolución de rocas lo que ocurre raramente, o bien por la oxidación bacteriana de MO (Porrás *et al.*, 1985).



Es este sentido las diferencias entre una época y otra en los sistemas Pozas Rojas, Poza Azul, El Churince y Los Domos muestran una disminución en la concentración de N-NH_3 , NO_2^- y NO_3^- ya que el N-NH_3 , al ser producto de la degradación del nitrógeno orgánico y por acción bacteriana, se reduce a formas nitrogenadas simples oxidándose gradualmente a NO_2^- y finalmente a NO_3^- (González, 2013). Es necesario resaltar que de acuerdo con la Ley Federal de Derechos (2019) ninguno excede el LMP de 0.5, 0.05 y 10 mg/L de N-NH_3 , NO_2^- y NO_3^- , respectivamente.



Figura 27. Desierto Chihuahuense: Sierra San Marcos.

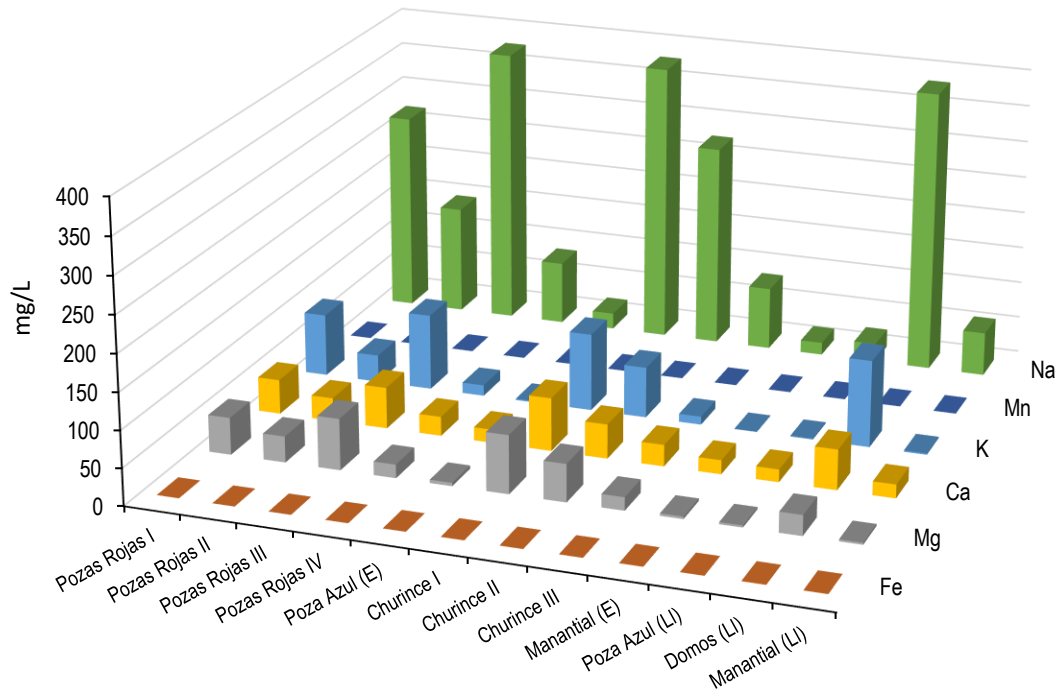


Figura 28. Cationes (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , K^+ y Mn^+).

El funcionamiento de los nutrientes en ambientes acuáticos juega un rol importante en su desempeño. En este sentido las concentraciones encontradas en época de estiaje en el sistema Pozas Rojas para Na^+ fueron de 86.2-378.7 mg/L, 14.7-103.5 mg/L de K^+ , un contenido de Mg^{2+} 18.3-69.5 mg/L, valores de Ca^{2+} y Fe^{2+} en intervalos de 26.1-56.0 y 0.0-0.2 mg/L respectivamente, así como 0.50 mg/L de Mn^+ en todas las pozas, es importante mencionar que las concentraciones más altas de nutrientes se encontraron en Pozas Rojas III exceptuando del contenido de Fe^{2+} . En el sistema Poza Azul el Na^+ registró 21.8 mg/L, Ca^{2+} de 18.1 mg/L, Mg^{2+} de 4.5 mg/L, K^+ de 1.8 mg/L, 0.50 mg/L de Mn^+ y Fe^{2+} no se detectó. La composición del sistema Churince para Na^+ osciló entre los 17.0-381.1 mg/L, valores de K^+ entre 0.7-105.5 mg/L, Ca^{2+} 19.0-72.1 mg/L, intervalos de Mg^{2+} 3.3-79.0 mg/L, N.D.-0.05 mg/L de Mn^+ y Fe^{2+} de 0.2 mg/L, cabe destacar que las concentraciones de los nutrientes van disminuyendo a lo largo del tramo donde se encuentran las pozas.

En la época de lluvias los sistemas Poza Azul y El Manantial registraron para Na^+ 25.0 y 59.6 mg/L, Ca^{2+} de 17.2 y 18.6 mg/L, Mg^{2+} de 2.7 y 2.6 mg/L, Fe^{2+} de 0.2 mg/L, Mn^+ de 0.1 mg/L y K^+ de 1.2 y 1.7 mg/L respectivamente. A diferencia de Los Domos donde el contenido de Na^+ es de 385 mg/L, K^+ de 117.9 mg/L, Ca^{2+} de 54.6 mg/L, Mg^{2+} de 27.6 mg/L, Fe^{2+} de 0.5 mg/L y no se detectó Mn.

Debido a que los iones y los elementos presentes en cuerpos de agua naturales se originan de procesos de mineralización y desgaste de las rocas que forman la corteza terrestre y de emanaciones del manto terrestre, a través de la actividad volcánica. El agua de mar está compuesta en promedio de un 96.52% de agua y un 3.49% de sustancias disueltas (mayormente sales) (Hach Lange, 2017).

En este sentido en las diferentes pozas estudiadas el Na^+ fue el elemento de mayor concentración ya que es liberado por la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos,



mientras que Fe^{2+} y Mn^{+} registraron las concentraciones más bajas, de acuerdo con Valencia (2011) el comportamiento del Mn^{+} es similar al del Fe^{2+} pues se trata de dos metales asociados, ya que en aguas de superficie son prácticamente insolubles, dependerá del anión al que estén asociados, al pH y al proceso de óxido-reducción. La presencia de Ca^{2+} en Poza Azul y El Manantial en temporada de lluvia se debe principalmente al proceso de mineralización y desgaste de roca caliza producto de la precipitación, en tanto que en Los Domos después del Na^{+} el K^{+} fue el más abundante debido a la solubilización de depósitos de silvina o carnalita, el K^{+} tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en las superficies de minerales con alta capacidad de intercambio iónico; por ello su concentración en aguas subterráneas naturales es generalmente mucho menor que la del Na^{+} (Porrás *et al.*, 1985).



Figura 29. Restos de un quelonio encontrado en el sistema El Churince, VCC.



Tabla 10. Características del color en diez sitios del VCC en temporada de estiaje y lluvia.

SITIO	pH Original			pH 7.6		
	λ dominante	Luminancia	Tonalidad	λ dominante	Luminancia	Tonalidad
Pozas Rojas I (E)	580	10%	Naranja Amarillento	570	10%	Amarillo Verdoso
Pozas Rojas II (E)	570	10%	Amarillo Verdoso	570	10%	Amarillo Verdoso
Pozas Rojas III (E)	580	10%	Naranja Amarillento	580	10%	Naranja Amarillento
Pozas Rojas IV (E)	475	10%	Azul-Verde	570	10%	Amarillo
Poza Azul (E)	500	10%	Verde	570	10%	Amarillo Verdoso
Churince I (E)	510c	10%	Azul-Púrpura	520c	10%	Azul-Púrpura
Churince II (E)	490	10%	Azul-Verde	490	10%	Azul-Verde
Churince III (E)	470	10%	Azul	460	10%	Azul
Manantial (E)	470	10%	Azul	470	10%	Azul
Poza Azul (LI)	480	10%	Azul	470	10%	Azul
Domos (LI)	570	10%	Amarillo Verdoso	560	10%	Amarillo Verdoso
Manantial (LI)	510	10%	Verde	475	10%	Azul-Verde

En aguas naturales existe una relación directa entre color y pH, de forma que cuando aumenta el pH lo hace el matiz (Marín, 2019), el color ligeramente rojizo, pardo, amarillento o verdoso es debido a la presencia de compuestos húmicos, férricos, pigmentos de algas, etc. (Grijalbo, 2016).

Por lo tanto, en época de estiaje en los sitios Pozas Rojas I y IV al evaluar ambas muestras a pH original y ajustado se presentaron diferentes tonalidades de naranja-amarillento/amarillo-verdoso y azul-verde/amarillo respectivamente, lo mismo sucedió con el sistema Poza Azul de verde/amarillo-verdoso y en época de lluvia en El Manantial de verde/azul verde; los resultados de las pozas restantes indican que las tonalidades no variaron con el pH original y pH ajustado, tomando en cuenta que en las muestras se eliminó la turbidez para evitar interferencias, considerando que la tonalidad es una propiedad ligada a la λ dominante y debido a que en regiones con abundante roca cálcica el agua presenta un color verdoso como lo son El Manantial y Poza Azul y en regiones de rocas férricas un tinte rojizo como ocurre en Pozas Rojas y El Churince.

Particularmente Los Domos presentó para la época de lluvia una tonalidad amarillo-verdoso ya que de acuerdo con Roldán y Ramírez (2008) se debe principalmente a los materiales alóctonos colorantes que resultan del contacto del agua con desechos orgánicos en varios estados de descomposición como compuestos húmicos, humatos y taninos, ya que una vez que han sido arrastrados dan un color amarillento al agua (figura 4) ya que por lo regular en aguas menos productivas u oligotróficas, se presentan colores azulados o verdosos de tal manera que los responsables del color son los sólidos disueltos originados en la descomposición natural de la materia orgánica (principalmente vegetales, ácidos húmicos y fúlvicos), el hierro y el manganeso. El color natural existe en el agua a partir de partículas coloidales cargadas negativamente originando repulsión impidiendo la unión y formación de una partícula más pesada para poder sedimentar (Roldán y Ramírez, 2008; Lorenzo-Acosta, 2006).



El aumento de contaminación en aguas superficiales ha generado la necesidad de cuantificar y evaluar su calidad para detectar el grado de contaminación, esto, conduce a obtener una diversidad de datos producto del análisis de varias pruebas, incluso dimensionalmente diferentes ya que unas son más significativas que otras (León, 1992).

Debido a que el índice de calidad del agua ICA, es expresado como el porcentaje del agua de un sistema superficial; cuando el agua está altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a cero por ciento, en tanto que cuando el agua está en excelentes condiciones el valor del índice será cercano a 100%. Por lo anterior los resultados obtenidos en el sistema Pozas Rojas indican alto grado de "contaminación" ya que el porcentaje de agua pura se encuentra en el rango de 0 a 11.86%, de forma similar el sitio Los Domos registró 15.45% de agua pura y clasificándose de acuerdo con León (1992) como "excesivamente contaminada"; esta "contaminación" del agua se presume que es debida a un exceso de iones dentro de la matriz acuosa, ya que su acumulación depende de la cantidad de sales solubles en agua y de las sales almacenadas en sedimentos y suelos, asimismo, no es atribuible al contenido de MO debido a que es insuficiente, dado que la producción de CO₂ es escasa (figura 14) y que la fuente de contaminación son las heces de la fauna de la zona es decir es de origen animal (figura 11).

La valoración de la calidad del agua hace referencia a su naturaleza física, química y biológica con relación a sus usos posibles (González *et al.*, 2013). En este sentido, en Poza Azul y El Manantial la clasificación de la calidad del agua es aceptable con 63.26 y 64.81% de agua pura, esto es que el agua de ambas pozas se halla en el límite o exceden los estándares de calidad. Como se mencionó anteriormente las sales además del suelo se encuentran en solución en las pozas de la región y en forma de sales que son transportadas por el viento y aportadas por el tipo de suelo.



10. CONCLUSIONES

- De acuerdo con las pruebas físicas, químicas y biológicas la calidad del agua del acuífero Cuatro Ciénegas está alterado lo que influye en la geodinámica del sitio.
- Los registros de calidad del agua indican que geoquímicamente, aunque existe conexión entre pozas, cada una posee características particulares debido a la cantidad y el tipo de aporte que reciben, por esta razón las diferencias en parámetros como pH, SO_4^{2-} , nutrientes, una capacidad de amortiguamiento alta. Asimismo, es importante destacar al Na^+ como catión dominante en todas las pozas del Valle.
- En época de estiaje las pozas, Rojas III, IV, Churince I y El Manantial, lo mismo que Poza Azul y El Manantial en época de lluvia poseen la capacidad de transformar los compuestos que a ellas se incorporan. En Pozas Rojas I, II, Poza Azul y El Churince II, III en época de estiaje y Los Domos en época de lluvia tienen una capacidad para degradar del 40 al 89% lo que se incorpore en ellas.
- De acuerdo con lo establecido en la Ley Federal de Derechos en materia de agua (2019); el pH de Pozas Rojas, Churince II y III y Los Domos en época de lluvia; Alcalinidad total en Pozas Rojas, Poza Azul, El Churince y El Manantial en época de estiaje y Fósforo total en Pozas Rojas IV, Churince I y III sobrepasan los LMP.
- Temperatura, DBO_5 , Organismos coliformes, Fe^{2+} y Cl^- las pozas del Valle cumplen con lo establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996, así como la Ley Federal de Derechos en materia de agua (2019).
- Los resultados físicos, químicos y biológicos muestran que, a pesar de que, parámetros como pH y Fósforo total se encuentran fuera de LMP, estos no indican influencia antrópica, ya que es atribuible a las características del sitio.

11. PERSPECTIVA

La presente investigación es un precedente para seguir estudiando las características físicas, químicas y biológicas del sistema hidrológico Cuatro Ciénegas ya que por causas naturales y antropogénicas las condiciones del sitio han sido modificadas con el paso del tiempo.

En este sentido, es indispensable que el sistema Pozas Rojas siga conservando el estado que actualmente posee, de no ser así, supondría llevar al sistema a condiciones de pérdida irreversibles. También se sugiere monitorear las pozas a diferentes profundidades y coleccionar las muestras en diferentes estratos y en ambas temporadas (estiaje y lluvia) en dicho sistema, así como en Poza Azul y El Churince para poder realizar una comparación en ambas épocas y dar seguimiento a su comportamiento geoquímico.



12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albarrán, R. E. (2010). *Evaluación de Procesos de Oxidación Química: Fe^{2+}/H_2O_2 y O_3/H_2O_2 , para Incrementar la Biodegradabilidad de Efluentes Acuáticos de Refinerías*. [Tesis de maestría, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México]. Recurso en línea. https://tesiumam.dgb.unam.mx/F?func=find-b-0&local_base=TES01
- Aldama, R. Á., Aparicio, M. F., Gutiérrez, O. C., Martínez, M. M., González, H. L., Herrera, Z. G., . . . Cardona, A. (2007). Comportamiento Hidrogeológico de los Acuíferos Cuatro Ciénegas y El Hundido, Coahuila, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, XXII(3), 37-59.
- Alvarez-Borrego, S. (2007). Principios Generales del Ciclo del Carbono en el Océano. En B. Hernández y G. Gaxiola (Edits.), *Carbono en Ecosistemas Acuáticos de México* (págs. 508) SEMARNAT/INEC/Centro de Investigación Científica de Educación Superior de Ensenada.
- Anaya, L. A. (2003). *Ecología Química*. México: Plaza y Valdés S.A de C.V.
- Anderson, K. L., Whitlock, J. E. y Harwood, V. J. (2005). Persistence and Differential Survival of Fecal Indicator Bacteria in Subtropical Waters and Sediments. *Applied and Environmental Microbiology*, 76(6), 3041-3048.
- Ángeles, C. (2006). *Geoquímica de Rocas Sedimentarias Jurásicas en Localidades Fosilíferas de la Sierra Madre Oriental*. [Tesis de licenciatura, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]. Recurso en línea. <https://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/handle/123456789/10577>
- APHA, AWWA y WEF. (2017). *Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23 ed.). Washington, DC: American Public Health Association.
- APHA, AWWA y WEF. (1992). *Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater* (18 ed.). Washington, DC: American Public Health Association.
- Arriaga, L. (2012). *Comportamiento Hidráulico y Geoquímico del acuífero del Valle El Hundido en Sistemas Fracturados y Granulares*. [tesis de maestría, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Recurso en línea. <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1080224825.PDF>
- Arrocha, G. H. (2018). *Diversidad y Bioprospección de Actinobacterias de Cuatro Ciénegas, Coahuila con Potencial Farmacéutico*. [Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio Académico Digital. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/17893>
- Barceló, I. D., Allende, I., Solís, H. E., Bussy, A.-L. y González, C. (2002). Determinación del Estado de Equilibrio de un Sistema Hídrico. *Revista de la Sociedad de Química de México*, 46(2), 93-104.



- Beita-Sandí, W. y Barahona-Palomo, M. (2010). Físico-química de las aguas superficiales de la Cuenca del río Rincón, Península de Osa, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*, 2(2), 157-179.
- Branco, S. (1984). *Limnología Sanitaria, Estudio de la Polución de Aguas Continentales*. Washington D.C: Serie Biología. OEA.
- Cid, A. A. (2014). *Estudio de Viabilidad de un Proceso de Eliminación de Amonio Mediante Electrooxidación en la EDAR Valle del Vinalopó (Elda)*. Alicante, España: Universitat d'Alacant.
- CONABIO. (2004). *Cuatro Ciénegas*. Recuperado el 15 de Enero de 2019. Obtenido de http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_048.html
- CONAGUA. (15 de Enero de 2019). *Normas Mexicanas. Vigentes en el Sector Hídrico*. Obtenido de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/normas-mexicanas-83266>
- CONAGUA. (2020). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Cuatro Ciénegas (0528), Estado de Coahuila*. Ciudad de México. Recuperado el 19 de Marzo de 2021. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/coahuila/DR_0528.pdf
- CONANP. (2019). *Áreas Naturales Protegidas Decretadas*. Recuperado el 06 de enero de 2020. http://sig.conanp.gob.mx/website/pagsig/datos_anp.htm
- CONCANACO. (2018). *CONCANACO-SERVYTUR*. Recuperado el 21 de enero de 2019. <http://www.concanaco.com.mx/documentos/indicadores-estados/Coahuila.pdf>
- Cuevas, E., Pacheco, J., Cabrera, A., Coronado, V., Vázquez, J. y Comas, M. (2001). Calidad Química y Bacteriológica del Agua Subterránea en el Principal Campo de Pozos para el Abastecimiento de Mérida, Yucatán, México. *Revista Ingeniería*, 5(3), 10.
- Daza, M. C., Álvarez, J. G. y Rojas, L. A. (2006). Efecto de materiales orgánicos e inorgánicos sobre las fracciones de fósforo de un Oxisol de los Llanos Orientales colombianos. *Agronomía Colombiana*, 24(2), 326-333.
- Díaz, A. S. (2018). *Sistema Automático para la Determinación de la Dureza del Agua en Descalcificadores Domésticos*. España: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Díaz, F. J. (2018). *Ecuaciones y Cálculos para el Tratamiento de Aguas*. España: Paraninfo S.A.
- DOF. (07 de Noviembre de 1994). *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado el 29 de octubre de 2019. http://www.dof.gob.mx/nota_to_imagen_fs.php?codnota=4759233&fecha=07/11/1994&cod_diario=205014.



- DOF. (16 de 06 de 2008). *ACUERDO por el que se dan a conocer los estudios técnicos del Acuífero 0528 Cuatro Ciénegas y se modifican los límites y planos de localización que respecto del mismo*. Recuperado el 5 de febrero de 2020. <http://dof.gob.mx/index.php>
- DOF. (2013). *DECRETO por el que se establece como zona reglamentada aquella que ocupa el acuífero denominado Cuatro Ciénegas, ubicado en el Estado de Coahuila*. Recuperado el 23 de marzo de 2019. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5312514&fecha=02/09/2013
- Espinosa, A. L. (2005). *Análisis de la diversidad de procariontes usando el gen 16S ribosomal: origen marino de la región de Cuatro Ciénegas, Coahuila*. México. [Tesis de maestría, Instituto de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México]. http://132.248.9.41:8880/jspui/handle/DGB_UNAM/TES01000341444
- Evans, S. B. (2005). *Using Chemical Data to Define Flow Systems in Cuatro Cienegas, Coahuila, Mexico*. [Thesis of master, The University of Texas at Austin]. <http://dx.doi.org/10.26153/tsw/11106>
- FAO, MINENERGIA, PNUD, y GEF. (2011). *Manual de Biogás*. Chile: FAO.
- Freeze, R. A., y Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. United States of America : Prentice-Hall.
- García, G. I., y López, L. Á. (2017). Cuatro Ciénegas: Conflictos Asociados al Turismo en un Área Natural Protegida. *Cuadernos de Turismo*(40), 295-314.
- García, R. M., Lozano, V. M., y Contreras-Balderas, S. (2014). Calidad Físicoquímica del Agua de 10 Manantiales en el Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila, México. En H. D. A., F. García de León, y V. Souza (Edits.), *Memorias de la Primera Junta de Investigadores de Cuatro Ciénegas* (págs. 1-49).
- García-Oliva, F., Elser, J., y Souza, V. (Edits.). (2018). *Ecosystem Ecology and Geochemistry of Cuatro Cienegas: How to Survive in an Extremely Oligotrophic Site*. Cham, Suiza: Springer.
- Gil, R. M. (1998). Demanda Bioquímica de Oxígeno de Efluentes con Productos Xenobióticos. *Ingeniería del Agua*, 5(4), 47-54.
- González, L. (2013). Nitrógeno amoniacal, importancia de su determinación. *Revista Mente y Materia*, 4(1), 12-13.
- González, M. V., Caicedo, Q. O., y Aguirre, R. N. (2013). Aplicación de los índices de calidad de agua NSF, DINIUS y BMWP en la quebrada La Ayurá, Antioquia, Colombia. *Gestión y Ambiente*, 16(1), 97-107.



- González-Abraham, A., Fagundo-Castillo, J. R., Carrillo-Rivera, J. J., y Rodríguez-Estrella, R. (2012). Geoquímica de los sistemas de flujo de agua subterránea en rocas sedimentarias y rocas volcanogénicas de Loreto, BCS, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 64(3), 319-333.
- Gordon, D. M., Bauer, S., y Johnson, J. R. (2002). The genetic structure of *Escherichia coli* populations in primary and secondary habitats. *Microbiology*, 148, 1513–1522.
- Grijalbo, F. L. (2016). *Elaboración de Inventarios de Focos Contaminantes*. UF1941. España: Tutor Formación.
- Guerrero, V. (2007). Cuatro Ciénegas, Laboratorio de la Evolución. *¿Cómo ves?*, 8, 11-15.
- Guerrero-Ortiz, P. L., Quintero-Lizaola, R., Espinoza-Hernández, V., Benedicto-Valdés, G. S. y Sánchez-Colín, M. d. (2012). Respiración de CO₂ como Indicador de la Actividad Microbiana en Abonos Orgánicos de *Lupinus*. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 355-362.
- HACH. (2020). *¿Cuál es la forma correcta de medición del fósforo? ¿Reactivo, hidrolizable con ácido o total?* Recuperado el 29 de marzo de 2020. https://support.hach.com/app/answers/answer_view/a_id/1020875/~/%C2%BFcu%C3%A1l-es-la-forma-correcta-de-medici%C3%B3n-del-f%C3%B3foro%3F-%C2%BFreactivo%2C-hidrolizable-con
- Hach. (2008). *Sistema de Medición de Conductividad para Aguas Salobres, ¿Qué es la conductividad?*. Recuperado el 17 de marzo de 2021. <https://latam.hach.com/salobres>
- Hach Lange. (2017). *Manual de Técnicas*. EE.UU. HACH Company.
- Hervé, D., Ledezma, R. y Orsag, V. (2002). *Limitantes y Manejo de los Suelos Salinos y/o Sódicos en el Altiplano Boliviano*. La Paz, Bolivia: IRD/CONDESAN.
- IMTA, SEMARNAT, CONAGUA, INE. (2005). *Estudio Hidrogeológico de los Acuíferos El Hundido y Cuatro Ciénegas, Coahuila*. CONAGUA.
- INAFED. (2010). *Estado de Coahuila*. Recuperado el 19 de noviembre de 2018, de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM05coahuila/>
- INEGI. (2009). *Prontuario de Información Geográfica Municipal de los Estados Unidos Mexicanos: Cuatro Ciénegas, Coahuila de Zaragoza*. INEGI.
- Instituto Nacional de Ecología. (1999). *Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Cuatro Ciénegas*. México. SEMARNAP.



- Isea, D., Vargas, L., Durán, J., Delgado, J., y Mendoza, R. (2015). Biokinetics parameters governing of BOD equation in a crab-processing industry wastewater. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*, 38(2), 112-121.
- Johannesson, K. H., Cortés, A., y Kilroy, K. C. (2004). Reconnaissance Isotopic and Hydrochemical study of Cuatro Ciénegas Groundwater, Coahuila. *Journal of South American Earth Sciences*, 17 (2), 171-180.
- León, V. L. (1992). Índices de calidad del agua (ICA), forma de estimarlos y aplicación en la cuenca Lerma-Chapala. En *Memorias del VII congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Cocoyoc, Morelia: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 20-26.
- Lesser y Asociados S.A de C.V. (2001). *Estudio de Evaluación Hidrogeológica e Isotópica en el Valle del Hudido, Coahuila*. Coahuila, México: Gerencia de aguas Subterráneas, Comisión Nacional del Agua.
- Ley Federal de Derechos. (2019). *Disposiciones Aplicables en Materia de Aguas Nacionales 2019*. México: SEMARNAT.
- López-Lozano, N. E., Eguiarte, L. E., Bonilla-Rosso, G., García-Oliva, F., Martínez-Piedragil, C., Rooks, C., y Souza, V. (2012). Bacterial Communities and the Nitrogen Cycle in the Gypsum Soils of Cuatro Ciénegas Basin, Coahuila: A Mars Analogue. *Astrobiology*, 12(7), 699-709.
- Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del Arte del Tratamiento de Aguas por Coagulación-Floculación. *ICIDCA*, XL(2), 10-17.
- Manahan, S. E. (2007). *Introducción a la Química Ambiental*. México: Reverté.
- Marín, G. R. (2019). *Fisicoquímica y Microbiología de los Medios Acuáticos: Tratamiento y Control de Calidad de Aguas* (2da ed.). España: Díaz de Santos.
- Martínez, P. M. (2007). *Diseño de una Prueba de Biodegradabilidad anóxica de Compuestos Orgánicos en Medio Líquido*. Pachuca de Soto, Hidalgo, México: Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- Martínez, U. J., Narros, S. A., De la fuente, G.-S. M., Pozas, R. F. y Díaz, L. V. (2006). *Experimentación en la Química General* (1a ed.). España: Paraninfo.
- Mayta, R. y Mayta, J. (2017). Remoción de Cromo y Demanda Química de Oxígeno de Aguas Residuales de Curtiembre por Electrocuagulación. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 83(3), 331-340.
- Medina-Chávez, N. O., Viladomat-Jasso, M., Olmedo-Álvarez, G., Eguiarte, L. E., Souza, V., y De la Torre-Zavala, S. (2019). Diversity of Archaea Domain in Cuatro Ciénegas Basin: Archaeal Domes. Submitted. doi:<https://doi.org/10.1101/766709>



- Metcalft y Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4ta ed.). China : McGraw-Hill.
- Minckley, W. L. (1969). Environments of the Bolson of Cuatro Ciénegas, Coahuila, Mexico: With Special Reference to the Aquatic Biota. *Science Series*(2), 1-65.
- Mota, Á. A. (2011). *Química del Medio Ambiente: El Agua* . Recuperado el 1 de Septiembre de 2020. Universidad de Granada: <https://www.ugr.es/~mota/Agua.html>
- Montiel, G. C. (2011). *Dinámica de C, N y P en Suelos Calcáreos en el Valle de Cuatro Ciénegas de Carranza, Coahuila*. [Tesis de maestría, Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Posgrado en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional Autónoma de México]. Morelia, Michoacán. Recurso en línea. <http://132.248.9.195/ptd2012/marzo/0677844/Index.html>
- Movellán, M. E. (2004). *Modelado de la Cuña Salina y del Flujo de Nutrientes en el Tramo Estuarino del Río Ebro*. Barcelona: Universitat de Barcelona, Departamento de Ecología. Recurso en línea. <http://hdl.handle.net/2445/35294>
- Neira, G. M. (2006). *Dureza en Aguas de Consumo Humano y Uso Industrial, Impactos y Medidas de Mitigación. Estudio de Caso: Chile*. Santiago de Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.
- Nieto, P. J. (2015). *Manipulación y Ensamblaje de Tuberías*. Madrid, España: Paraninfo.
- NOM-001-SEMARNAT-1996. *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996 que Establece los Límites Máximos Permisibles de Contaminantes en las Descargas de Aguas Residuales en Aguas y Bienes Nacionales*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca.
- NOM-059-SEMARNAT-2010. *Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo*. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca.
- NMX-AA-007-SCFI-2013. *Análisis de Agua-Medición de la Temperatura en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas*. México: Secretaría de Economía.
- Núñez, F., y O’Ryan, O. (2000). Bases del Tratamiento de Excretas en el Medio Rural. *TecnoVet*, 6(1).
- OECD. (1992). *Guideline for Testing of Chemicals*. EE. UU.
- Ortiz, A. S., y Romo, A. M. (2016). Impactos Socioambientales de la Gestión del Agua en el Área Natural Protegida de Cuatro Ciénegas, Coahuila. *Región y Sociedad*, 28(66), 195-230.
- Pacheco, A. J., Pat, C. R. y Armando, C. S. (2002). Análisis del ciclo del nitrógeno en el medio ambiente con relación al agua subterránea y su efecto en los seres vivos. *Ingeniería*, 6(3), 73-8.



- Palacios, Z. E. (2012). *Síntesis de fosfatos ácidos de aluminio mediante precipitación. Aplicación en sistemas retardantes de llama*. [Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. <http://hdl.handle.net/10486/11976>
- Peña, P. E. (2007). *Calidad de Agua: Trabajo de Investigación Oxígeno Disuelto*. Guayaquil: Escuela Superior del Litoral.
- Perdomo, C. y Barbazán, M. (s.f.). *Áreas de Suelos y Aguas: Cátedra de Fertilidad*. Facultad de Agronomía, Universidad de la República. Recuperado el 16 de agosto de 2020. <http://www.fagro.edu.uy/~fertilidad/publica/Tomo%20N.pdf>
- Pino, V. E. y Coarita, A. F. (2018). Caracterización hidrogeológica para determinar el deterioro de la calidad del agua en el acuífero la Yarada media. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(4), 477-490.
- Porras, M. J., Nieto, L.-G. P., Álvarez-Fernández, C., Fernández, U. A., y Gimeno, M. V. (1985). *Calidad y Contaminación de las Aguas Subterráneas en España*. España: Instituto Geológico Minero de España.
- PRONATURA NORESTE A.C. (2000). *Programa Ecorregional de Conservación del Desierto Chihuahuense: Reporte Técnico Final*. PRONATURA NORESTE. p. 20.
- Quintanilla, J. Á. (2001). Listados Florísticos de Méxicio. Flora de Coahuila. Departamento de Botánica, Universidad Autónoma Agraria. 23, 7-138.
- Ramírez, G. J. (2011). *Marco Geológico-Estratigráfico del Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila, México*. [Tesis de maestría, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Recurso en línea. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/2704>
- Ramos-Ortega, L. M., Vidal, L. A., Vilardy, S. y Lina, S.-D. (2008). Análisis de la Contaminación Microbiológica (Coliformes Totales y Fecales) en la Bahía de Santa Marta, Caribe Colombiano . *Acta Biológica Colombiana* , 13(3), 87-98.
- RAMSAR. (2014). *La Importancia de los Humedales*. Recuperado el 22 de enero de 2019, de <https://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-importancia-de-los-humedales>.
- Raygoza, M. A., Gaytán, M. R., Rodríguez, C. O. y Nolasco, M. A. (2006). *Reporte de la quema prescrita realizada en la Reserva Pozas Azules*. Coahuila, México : CONAFOR.
- Rebollar, E. A., Avitia, M., Eguiarte, L. E., González-González, A., Mora, L., Bonilla-Rosso, G. y Souza, V. (2012). Water-Sediment Niche Differentiation in Ancient Marine Lineages of Exiguobacterium Endemic to the Cuatro Cienegas Basin. *Environmental Microbiology*, 14(9), 2323-2333.



- Rodríguez, M. J. (2007). *Estudio de Impacto Ambiental sobre la Reserva Ecológica del Valle de Cuatro Ciénegas Coahuila ante la Apertura del Proyecto Agropecuario del Valle del Hundido*. México: Proyecto SEMARNAT-CONACYT.
- Rodríguez, V. F., Pérez, S. A., Orozco, B. C., González, D. M. y Ibeas, R. M. (2000). Biodegradabilidad de la Materia Orgánica Natural del Agua y Efecto del Ozono. *Ingeniería del Agua*, 7(3), 271-278.
- Roldán, P. G., y Ramírez, R. J. (2008). *Fundamentos de Limnología Neotropical* (2a ed.). Medellín: Universidad de Antioquia.
- Sancha, A. M. (2013). *Caracterización Físico-Química y Microbiológica de un Proceso de Tratamiento de Lixiviados de Vertedero*. España: Universidad de Oviedo.
- Sanchez, D. F. (2001). El Fósforo, Parámetro Crítico de Calidad de Agua: Técnicas Analíticas y de Muestreo. Venezuela: ABES - XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria e Ambiental.
- Sánchez, L. L. y Corrales, R. L. (2005). Congelación Bacteriana: Factores que Intervienen en el Proceso. *Nova*, 3(3), 109-113.
- Sánchez, R. J. (2008). *Estudio estadístico para la obtención de las relaciones necesarias entre parámetros analíticos de las aguas residuales para su caracterización según los modelos matemáticos de fangos activados*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia-Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.
- Sánchez, S. R. (2012). *Universidad de Salamanca*. Recuperado el 18 de diciembre de 2019, de http://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion_geoquimica.pdf
- Sánchez-Sánchez, J. A., Álvarez-Legorreta, T., Pacheco-Ávila, J. G., González-Herrera, R. A. y Carrillo-Briebiezca, L. (2015). Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas del sur del Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1), 62-76.
- Santillan, R. P. (2007). *Estudio Hidrogeoquímico del Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila, México*. [Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México]. Recurso en línea. http://132.248.9.41:8880/jspui/handle/DGB_UNAM/TES01000624138
- SARH . (1980). *Estudio Geohidrológico Preliminar en la Zona Cuatro Ciénegas-Ocampo, Coahuila*. México: Subdirección de Geohidrología y de Zonas Áridas.
- Secretaría de Economía . (2015). *Información Económica y Estatal*. Coahuila.
- SEDESOL . (1992). *Proyecto de ordenamiento ecológico del uso y aprovechamiento del agua para la región de Cuatro Ciénegas, Coahuila*. México: Instituto Nacional de Ecología.



- SEDUE-IPN. (1989). *Insumos para el Ordenamiento Ecológico de la Zona Árida*. México: Instituto Nacional de Ecología.
- SEMARNAT . (2008). *Áreas de Protección de Flora y Fauna en México*. Recuperado el 21 de junio de 2019, de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/areas-de-proteccion-de-flora-y-fauna-en-mexico?idiom=es>
- SEMARNAT . (2013). *El Medio Ambiente en México: Agua - Calidad*. Recuperado el 19 de enero de 2020. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/06_agua/6_2_1.html
- SEMARNAT. (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde*. Edición 2015. SEMARNAT.
- SEMARNAT. (07 de Noviembre 2016). *Cuatro Ciénegas, Área de Protección de Flora y Fauna*. Recuperado el 29 de octubre de 2019, de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/cuatrocienegas-area-de-proteccion-de-flora-y-fauna>
- Servicio Geológico Mexicano. (2008). Edición de cartas geológico-mineras y geoquímicas escala 1:50000. Recuperado el 20 de febrero de 2021 de http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas_Ed50.jsp
- Sierra, P. J. (2001). Determinación experimental de la curva de la DBO y el valor de las constantes K y Lo en una muestra de agua contaminada del río Bogotá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* (11), 89-93.
- SIGEIA. (2018). SEMARNAT. Recuperado el 25 de octubre de 2019, de <https://mapas.semarnat.gob.mx/sigeia/#/sigeia>
- Solano, P. J. (2005). *Determinación de Fósforo Total, Nitrógeno y Carbono Orgánico en Sedimentos del Lago de Tota Boyacá, Colombia*. Colombia: Universidad de los Andes.
- Solís-Castro Y., Alberto, Z.-Z. L., y Mora-Alvarado, D. (2017). Conductivity as a Predictive Parameter of Hardness in Groundwater and Spring Water of Costa Rica. *Tecnología en Marcha*, 31(1), 35-46.
- Soto, F. J. (2010). La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, XII(2), 67-177.
- Souza, V., Siefert, J., Escalante, A., Elser, J., y E., Eguiarte, L. (2012). The Cuatro Cienegas Basin in Coahuila, Mexico: An Astrobiological Precambrian Park. *Astrobiology*, 12(7), 641-647.
- SWRCB. (2010). Folleto Informativo Amoniaco. California, USA.

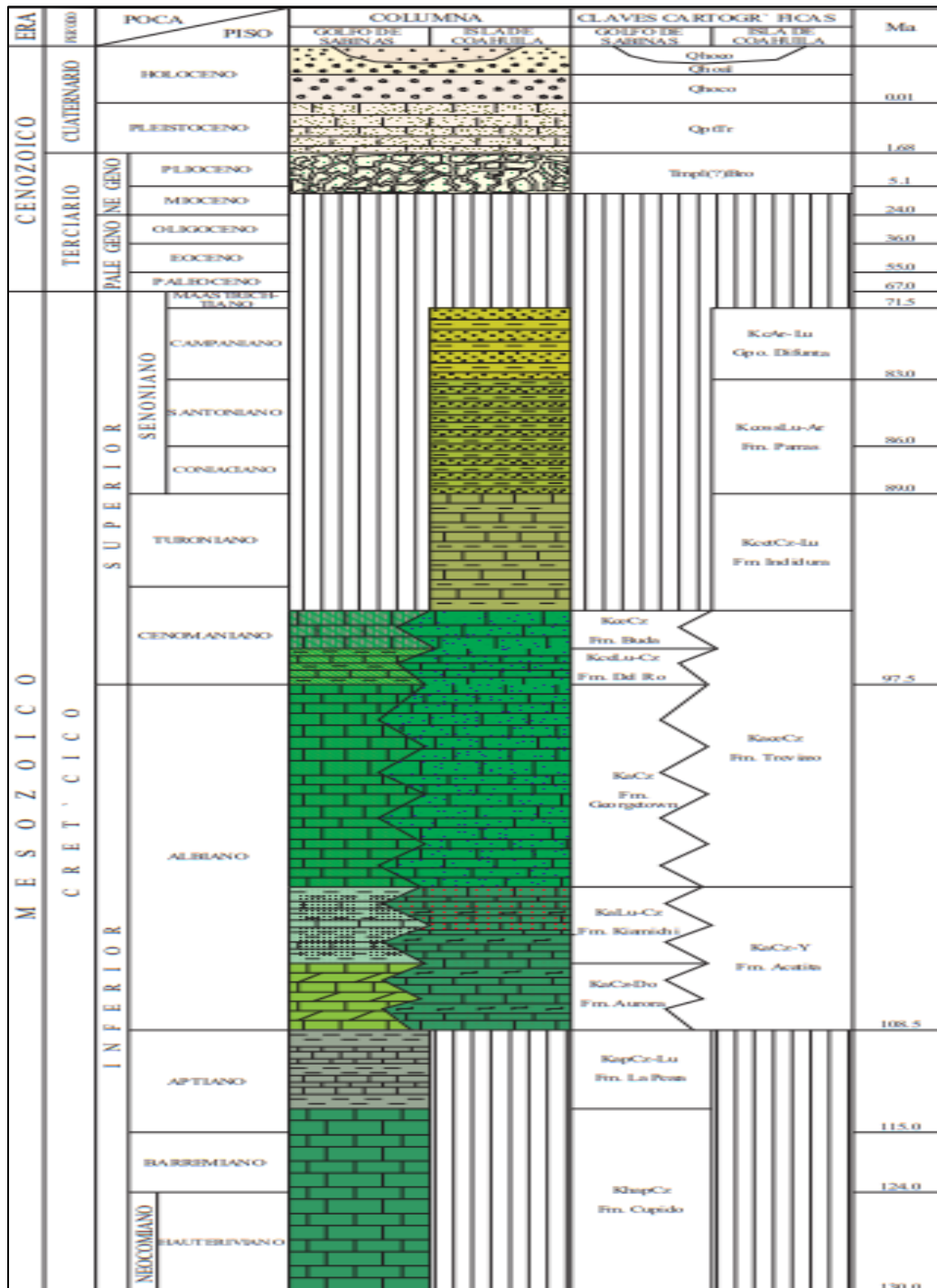


- Tapia-Torres, Y., y García-Oliva, F. (2013). La Disponibilidad del Fósforo es Producto de la Actividad Bacteriana en el Suelo en Ecosistemas Oligotróficos: Una Revisión Crítica. *Terra Latinoamericana*, 31(3), 231-242.
- Valencia, E. C. (2011). *Química del Hierro y Manganeso en el Agua, Métodos de Remoción*. Ecuador: Universidad de Cuenca - Facultad de Ingeniería - Escuela de Ingeniería Civil.
- Vázquez, C. P. (2017). *Estudio de la Diversidad Microbiana de Bacterias Anoxigénicas Púrpuras del Azufre en las Lagunas de Cuatro Ciénegas, Coahuila*. [Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México]. Recurso en línea. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/207071>
- Vázquez, R. G. y Beltrán, H. R. (2004). Pruebas normalizadas para la evaluación de la biodegradabilidad de sustancias químicas. Una revisión. *Interciencia*, 29(10), 568-573.
- Vazquez-Rosas-Landa, M., Ponce-Soto, G. Y., Aguirre-Liguori, J. A., Thakur, S., Scheinvar, E., Barrera-Arredondo, J., . . . Souza, V. (2020). Population Genomics of Vibrionaceae isolated from an Endangered Oasis Reveals Local Adaptation After an Environmental Perturbation. *BMC Genomics* 21, 418.
- Vela, C. M., Vela, C. E., y Lozano, G. D. (2015). *Evaluación del Conocimiento Actual del APFF de Cuatro Ciénegas, Coahuila: Fase 1*. Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey. Centro de Calidad Ambiental. México, D.F: SNIB-CONABIO Proyecto No. JN002.
- Velez, P., Gasca-Pineda, J., Rosique-Gil, E., Eguiarte, E. L., Espinosa-Azuar, y Souza, V. (2016). Microfungal oasis in an oligotrophic desert: diversity patterns and community structure in three freshwater systems of Cuatro Cienegas, Mexico. *PeerJ Chemistry Journals*. doi:10.7717/peerj.2064
- Wolaver, B. D., Sharp Jr, J. M., Rodríguez, J. M., e Ibarra, F. J. (2008). Delineation of Regional Arid Karstic Aquifers: An Integrative Data Approach. *Ground Water*, 46(3), 396-413.



13. ANEXOS

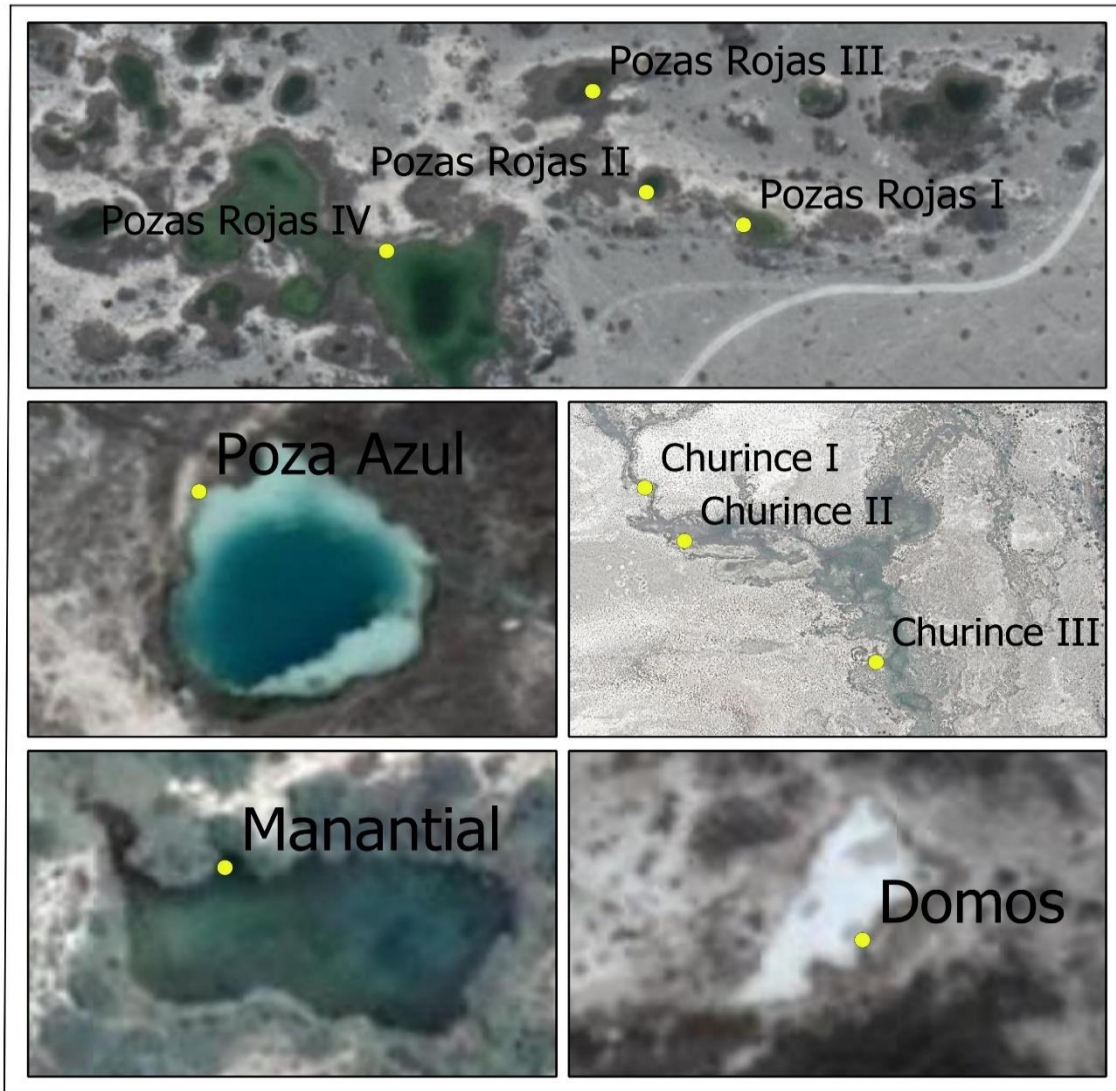
Anexo I. Columna Estratigráfica del Valle de Cuatro Ciénegas, Coahuila, México.



(Servicio Geológico Mexicano, 2008)



Anexo II. Sitios de muestreo dentro del APFFCC.



0 0.05 0.1 km



SIMBOLOGÍA

● Sitios de muestreo



CARRERA DE BIOLOGÍA - LABORATORIO DE PROYECTOS AMBIENTALES

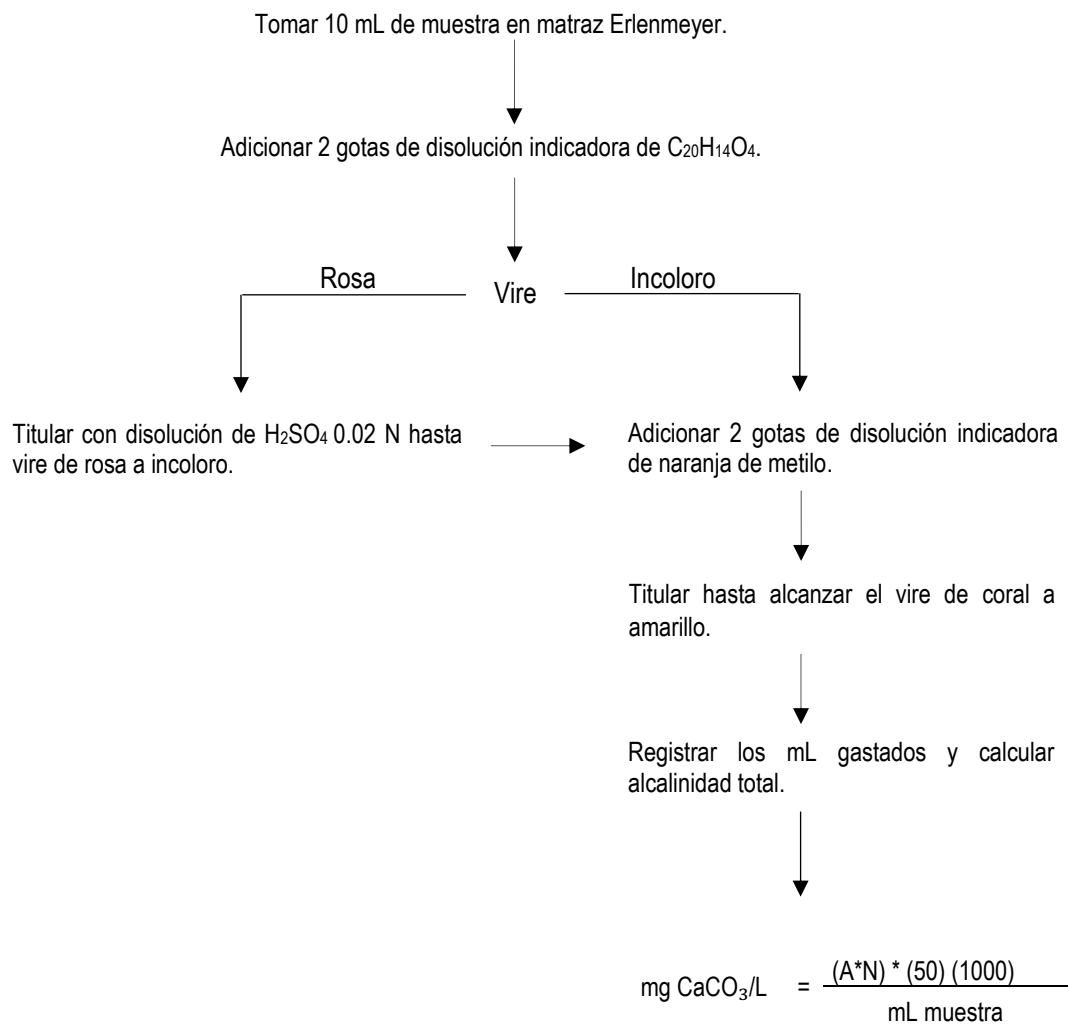
ELABORADO POR: CARMEN FABIOLA HERNÁNDEZ LÓPEZ





Anexo III. Métodos estandarizados para la evaluación de parámetros físicos, químicos y biológicos.

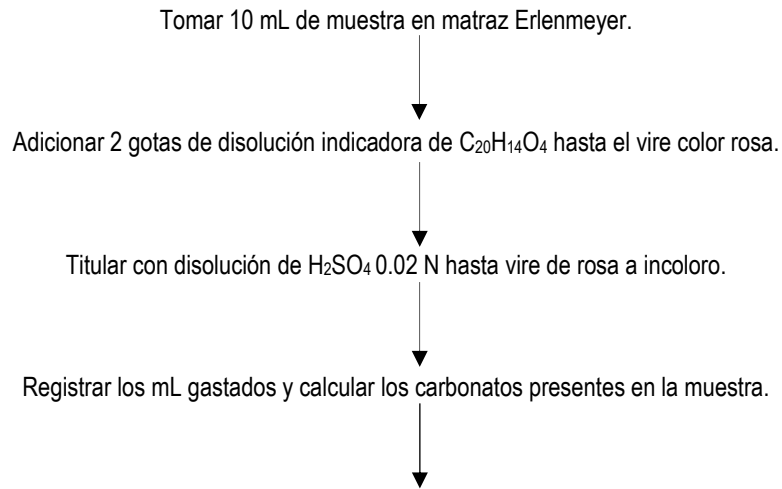
i. Alcalinidad Total (NMX-AA-036-SCFI-2001)



Donde:
N=normalidad del titulante
A=volumen del titulante



ii. Carbonatos (CO_3^{2-})
(NMX-AA-036-SCFI-2001)



$$\text{mg CaCO}_3/\text{L} = \frac{(A*N) * (50) (1000)}{\text{mL muestra}}$$

Donde:
N=normalidad del titulante
A=volumen del titulante



iii. Cloruros (Cl⁻)
(APHA, 1992 (4500-Cl⁻B))

Tomar 20 mL de muestra.



En caso de:

Color: Añadir 0.6 mL de suspensión Al (OH)₃, mezclar, dejar sedimentar y filtrar.
Sulfuro, sulfito o tiosulfato: Adicionar 0.5 mL de H₂O₂ y agitar 1 minuto.



Valorar directamente las muestras si se encuentran entre pH 7 y 10.



Añadir 1 mL de solución indicadora de K₂CrO₄ (preparar al momento de su uso).



Titular con AgNO₃ hasta un punto final amarillo rosado.



Registrar los mL gastados y calcular la concentración de Cl⁻ mediante:

$$mg Cl^{-} / L = \frac{(A - B) \times N \times 35.450}{mL muestra}$$

Donde:

A= mL valoración muestra

B= mL valoración blanco

N= normalidad de AgNO₃



iv. Color
(APHA, 1992 (2120 C))

Tomar 10 mL de muestra previamente filtrada.

Utilizar dos muestras, una a pH original y otra a pH 7.6 con NaOH y H₂SO₄.

Determinar los valores de transmitancia (%) de acuerdo con la siguiente tabla:

Ordinales	Longitud de onda (nm)		
	X	Y	Z
1	435	489	422
2	461	515	432
3	544	529	438
4	564	541	444
5	577	551	450
6	588	561	455
7	599	572	462
8	610	584	468
9	624	600	477
10	645	627	495

Registrar valores obtenidos, totalizando cada columna, multiplicando por los factores adecuados para obtener los valores triestímulo X, Y, Z.

Factores utilizando 10 ordinales		
X	Y	Z
0.09806	0.10000	0.118015

Calcular el coeficiente tricromático X e Y con los valores triestímulo mediante las ecuaciones:

$$X = \frac{x}{x+y+z} \quad Y = \frac{y}{x+y+z}$$

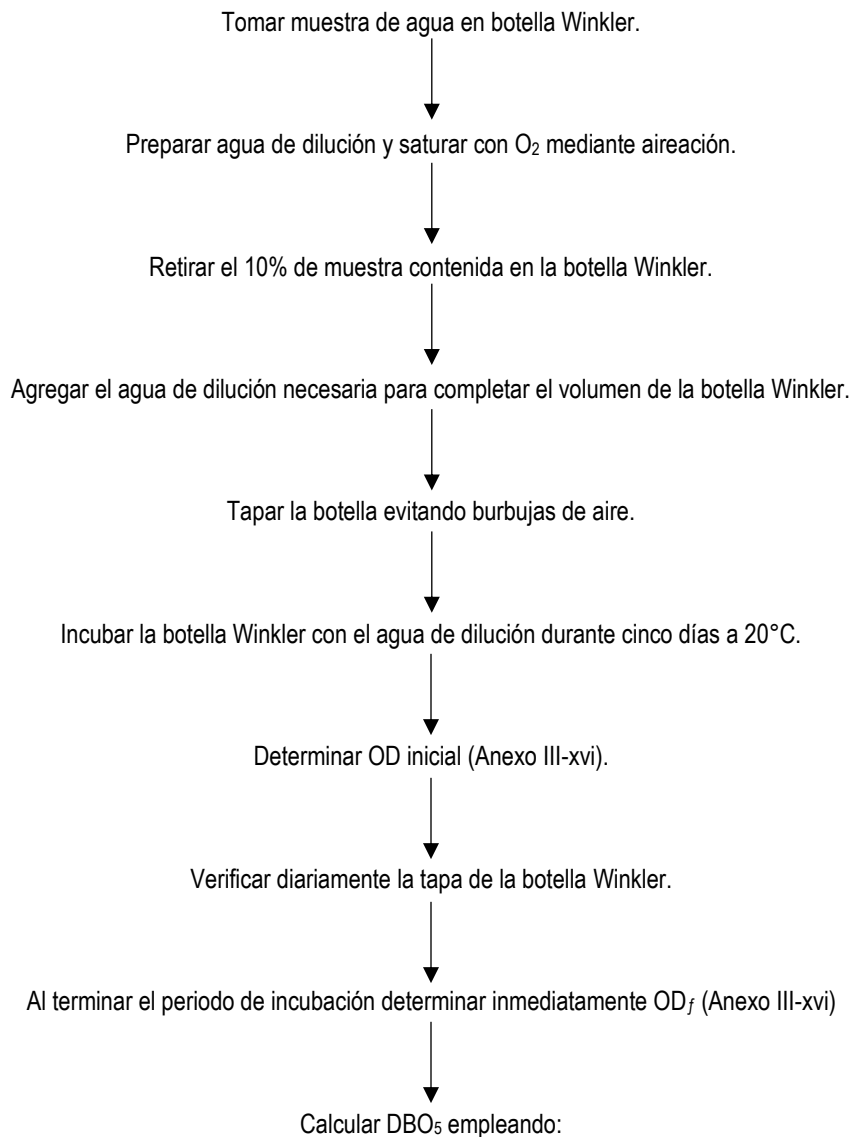
Localizar en los diagramas de cromaticidad la tonalidad y saturación.

A partir de la tonalidad determinar la luminancia.

λ (nm)	Matiz	λ (nm)	Matiz
400-465	Violeta	580-587	Naranja amarillento
465-482	Azul	587-598	Naranja
482-497	Azul-verde	598-620	Naranja-rojo
497-530	Verde	620-700	Rojo
530-575	Amarillo verdoso	400-530c	Azul púrpura
575-580	Amarillo	530c-700	Rojo púrpura



v. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)
(NMX-AA-028-SCFI-2001)



$$DBO_5 (mg/L) = \frac{OD_i mg/L - OD_5 mg/L}{\% \text{ dilución en decimales}}$$

Donde:

OD_i mg/L= oxígeno disuelto inicial

OD_f mg/L= oxígeno disuelto quinto día



vi. Demanda Química de Oxígeno (DQO)
(APHA, 1992 (5220 D))

Lavar los tubos de cultivo y tapones antes de usarlos (tabla 5).



Colocar 8 mL de muestra en los tubos y añadir 2 mL de solución de digestión



Cerrar los tubos e invertir para mezclar



Colocar los tubos en un digestor de bloque a 150°C.



Someter a reflujo durante 2 horas y enfriar a temperatura ambiente.



Invertir las muestras para determinar la reducción de dicromato.



Leer a 600 nm. Calcular con la siguiente ecuación:

$$O_2 = \frac{\text{mg } O_2 \text{ en vol. final} * 1000}{\text{mL muestra}}$$



vii. Dureza Total
(NMX-AA-072-SCFI-2001)

Colocar 20 mL de muestra en matraz Erlenmeyer.



Añadir 1 mL de disolución amortiguadora de amonio.



Añadir 4 gotas de indicador eriocromo negro T hasta vire vino rojizo.



Titular con disolución EDTA 0.01 M.



Agitar continuamente hasta el punto final de vire de color rojizo a azul.



Calcular dureza total con la siguiente ecuación:

$$\text{mg/L CaCO}_3 = \frac{\text{mL gastados} \cdot M \cdot 100.1 \cdot 1000}{\text{mL muestra}}$$

Donde:
M= molaridad EDTA



viii. Fósforo Hidrolizable
(PROY-NMX-AA-029/1-SCFI-2008)

Tomar 20 mL de muestra previamente filtrada.



Acidificar con H₂SO₄ a pH <1 y hervir suavemente 30 minutos.



Añadir H₂O y mantener un volumen de 30 mL.
Enfriar y ajustar pH 6.5 con NaOH.



Transferir en matraz volumétrico de 50 mL y diluir a 40 mL.



En agitación añadir 1 mL de disolución C₆H₈O₆ y
2 mL de solución II de molibdato ácido y aforar a 50 mL.



Medir la absorbancia a 880 nm transcurridos 10 minutos.



Calcular la concentración de fósforo hidrolizable utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho_p = \frac{(A - A_0) V_{m\acute{a}x}}{f \times V_s}$$

Donde:

A = absorbancia de la porción de prueba

*A*₀ = absorbancia del blanco de ensayo

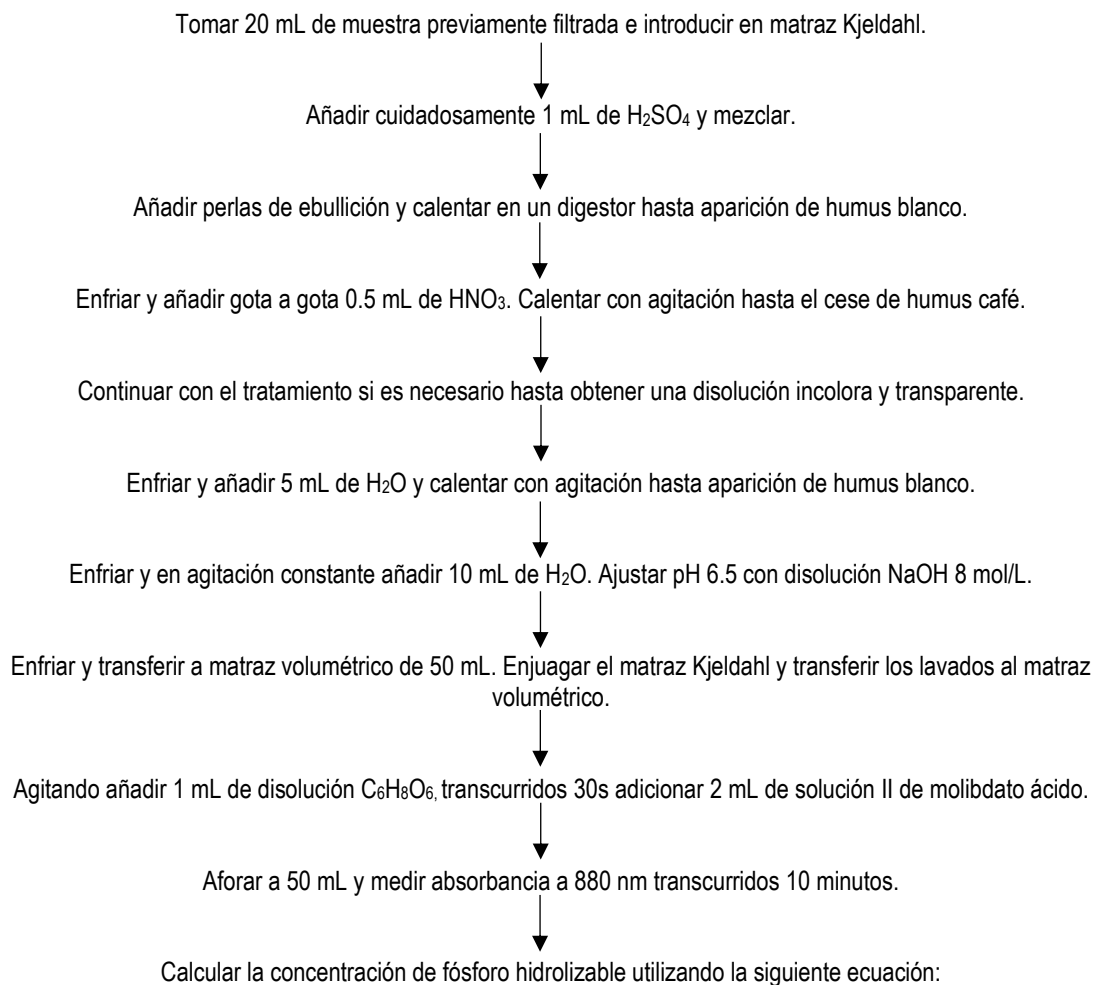
f = pendiente de la curva (L/mg)

*V*_{máx} = volumen del matraz aforado (mL)

*V*_s = volumen de la porción de prueba (mL)



ix. Fósforo Total
(PROY-NMX-AA-029/1-SCFI-2008)



$$\rho_p = \frac{(A - A_0) V_{m\acute{a}x}}{f X V_s}$$

Donde:

A = absorbancia porción de prueba

*A*₀ = absorbancia blanco de ensayo

f = pendiente de la curva (L/mg)

*V*_{máx} = volumen matraz aforado (mL)

*V*_s = volumen porción de prueba (mL)



x. Nitrógeno Amoniacal (N-NH₃)
(NMX-AA-026-SCFI-2010)

Purgar equipo de destilación agregando 2 mL de agua destilada, 2 mL de hidróxido-tiosulfato de sodio añadiendo perlas de ebullición. Descartar el destilado.



Tomar 50 mL de muestra filtrada, añadir 3 mL de solución amortiguadora de boratos y ajustar pH 9.5.



Trasferir a matraz de destilación añadiendo perlas de ebullición, y conectar al condensador.



Destilar la muestra cuidando una temperatura de 29 °C.



Recolectar el condensado en matraz que contenga 3 mL de disolución indicadora de H₃BO₃.



Completar la destilación recolectando 30 mL de destilado. Retirar el matraz colector.



Titular con disolución H₂SO₄ 0.006 mol/L hasta el vire de verde esmeralda a morado.



Registrar el volumen gastado y calcular la concentración de nitrógeno amoniacal, con la siguiente fórmula:

$$Y_{(N-NH_3)} = (V_A - V_B) \cdot c(H_2SO_4) \cdot A_r(N) / V_m$$

Donde:

$Y_{(N-NH_3)}$ = concentración en masa de nitrógeno amoniacal

V_A = mL de ácido sulfúrico gastados en la titulación

V_B = mL de ácido sulfúrico gastados en el blanco

$c(H_2SO_4)$ = concentración de ácido sulfúrico en mol/L

V_m = mL de muestra

$A_r(N)$ = masa atómica del nitrógeno



xi. Nitratos (NO_3^-)
(APHA, 1992)

Colocar 25 mL de muestra en cápsulas de porcelana.



Evaporar a sequedad y enfriar a temperatura ambiente.



Añadir por las paredes 2.5 mL de H_2O destilada.



Agregar 0.5 de $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}_7\text{S}_2$ y mezclar con agitador de vidrio.



Agregar 2 mL de NH_4OH (excepto el blanco) hasta tomar color amarillo.



Trasferir a matraz volumétrico y aforar a 50 mL.
Leer absorbancia a 410 nm.



Calcular la concentración con:

$$Y = mX + b$$

Donde:

m= pendiente

b = ordenada al origen

Y = absorbancia

X = concentración (mg $\text{N-NO}_3^-/\text{L}$).



xii. Nitritos (NO_2^-)
(MODIFICADO DE NMX-AA-154-SCFI-2011)

Tomar 25 mL de muestra en matraz Erlenmeyer.



Ajustar el pH de la muestra a 6 con HCl.



Añadir 0.5 g de reactivo seco.



Esperar 10 minutos hasta el máximo desarrollo del color.



Leer absorbancia a 543 nm. Calcular la concentración con:

$$Y = mX + b$$

Donde:

m = pendiente

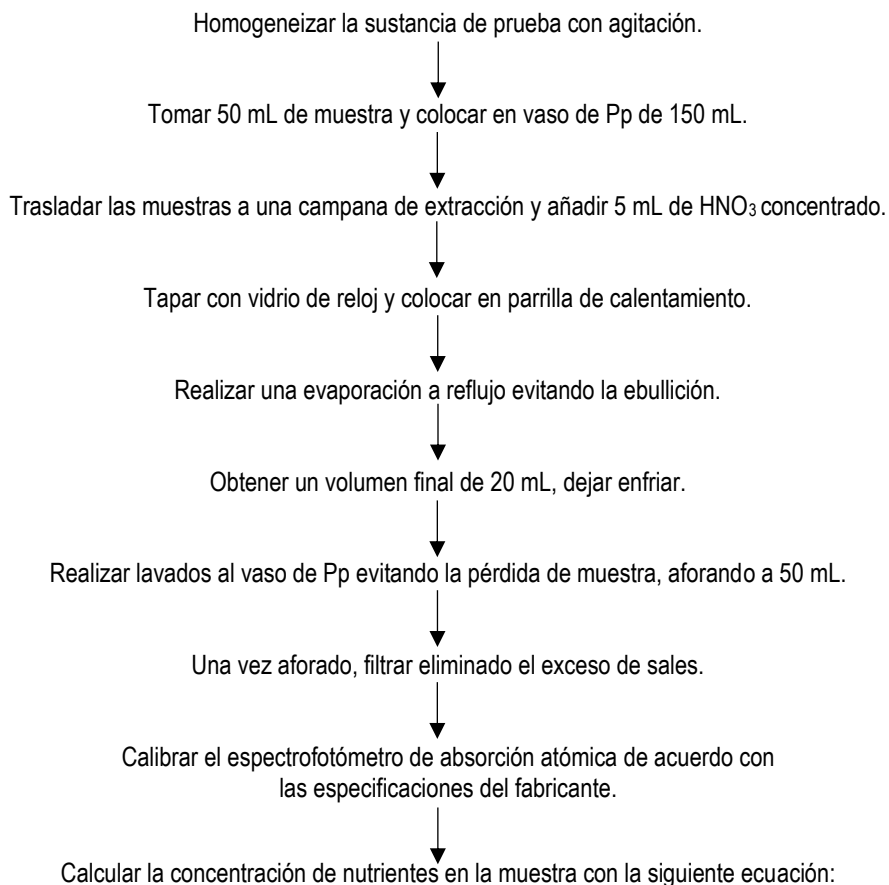
b = ordenada al origen

Y = absorbancia

X = concentración (mg $\text{N-NO}_2^-/\text{L}$).



xiii. Cationes (Fe^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mn^+)
(MODIFICADO DE NMX-AA-051-SCFI-2016)



$$Y = mX + b$$

Donde:

Y = absorbancia de la muestra.

m = pendiente.

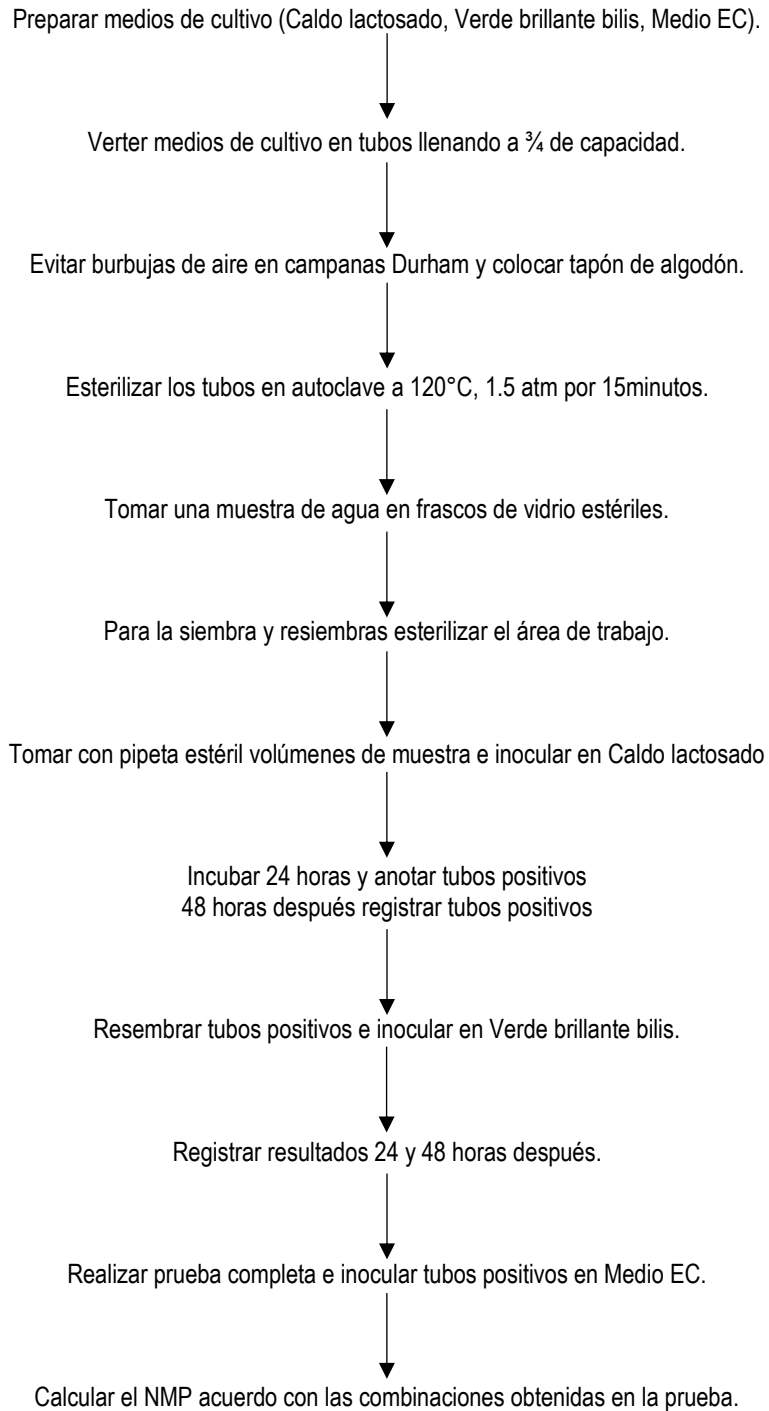
b = ordenada al origen.

X = concentración de la muestra.



xiv. Organismos Coliformes (APHA, 1992 (9221 B))

 ATENCIÓN: LA PRUEBA SE REALIZARÁ BAJO ESTRUCTAS CONDICIONES DE ESTERILIDAD.





xv. Ortofosfatos (PO_4^{3-})
(PROY-NMX-AA-029/1-SCFI-2008)

Tomar 20 mL de muestra previamente filtrada y ajustar pH 6.5.



Añadir 0.4 mL de H_2SO_4 , 1 mL de disolución $C_6H_8O_6$ y 1 mL de disolución $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$.



Mezclar y dejar reducir durante 10 minutos.



Añadir 2 mL de solución II de molibdato ácido y aforar a 50 mL.



Mezclar y transcurridos 10 minutos medir la absorbancia a 880 nm.



Calcular la concentración de ortofosfato utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho_p = \frac{(A - A_0) V_{m\acute{a}x}}{f X V_s}$$

Donde:

A = absorbancia porción de prueba

A_0 = absorbancia blanco de ensayo

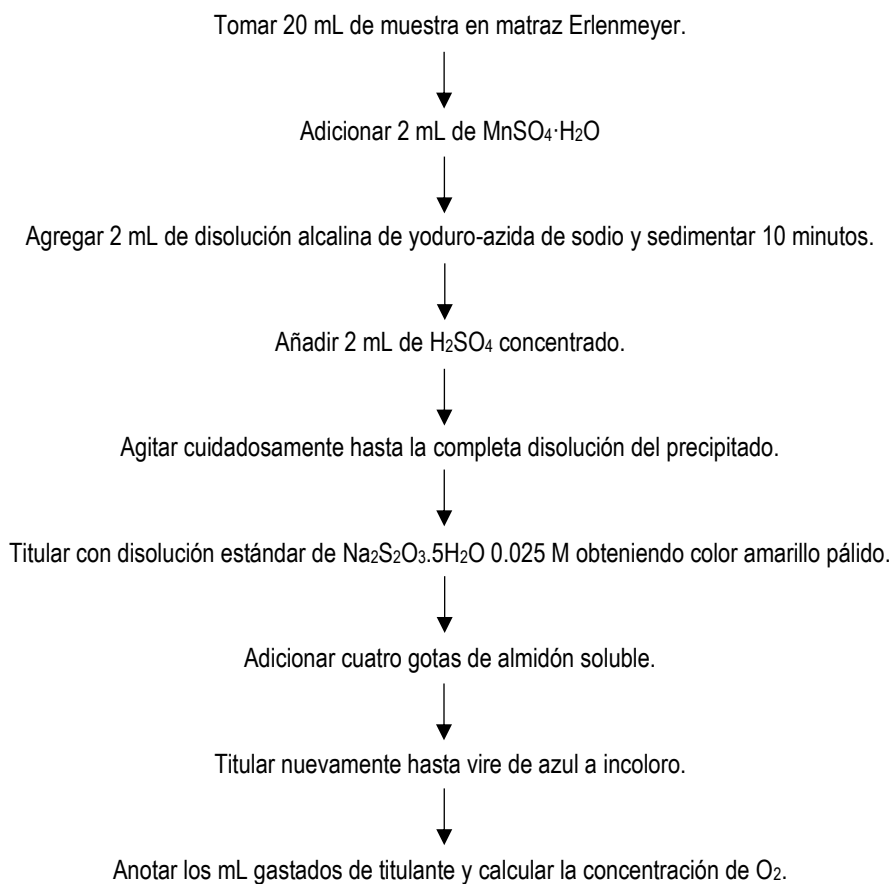
f = pendiente de la curva (L/mg)

$V_{m\acute{a}x}$ = volumen matraz aforado (mL)

V_s = volumen porción de prueba (mL)



xvi. Oxígeno Disuelto (OD)
(NMX-AA-012-SCFI-2001)



$$\text{mg O}_2/\text{L} = \frac{M \times \text{mL titulante} \times 8000}{\text{mL muestra}}$$

Donde:

M = molaridad de tiosulfato.



xvii. Pérdida de Carbono Orgánico Disuelto (COD)

(Modificado de 301-A OEDC, 1992)

Lavar frascos de 150 mL de capacidad antes de cada prueba (tabla 5).
Utilizando durante el procedimiento agua desionizada o destilada

Preparación de soluciones stock para medio mineral:

A	KH_2PO_40.425 g K_2HPO_4 1.08 g $Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$1.67 g NH_4Cl0.025 g	Disolver en agua y completar 50 mL pH 7.4
B	$CaCl_2$ 0.275 g ó $CaCl_2 \cdot 2H_2O$0.364 g	Disolver en agua y completar 10 mL
C	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.225 g	Disolver en agua y completar 10 mL
D	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$0.0025 g	Disolver en agua y completar 10 mL

Nota: Para evitar preparar la solución antes del uso agregar una gota de HCl concentrado por litro.

Preparación medio mineral: Mezclar 10 mL de solución (A) con 800 mL de H_2O , luego agregar 1 mL de soluciones (B), (C) y (D) completando 1000 mL.

Pre-acondicionamiento del inóculo: En vaso de Pp agregar 5g de sedimento y añadir 8 mL de H_2O para suspender, agitar 15 minutos con agitador magnético y distribuir en cajas Petri, colocar en la incubadora 1 hora a 30-35°C. Transcurrido el tiempo regresar el inóculo a los vasos de Pp y volver a agitar por 15 minutos más, distribuyendo nuevamente en cajas Petri e incubar a la misma T° por 72 h.

Utilizar los siguientes frascos:

1, 2.....	Sustancia de ensayo (muestra) e inóculo (blanco)
3,4.....	Inóculo (sedimento)
5.....	Compuesto de referencia (anilina) e inóculo
6.....	Sustancia de ensayo y agente esterilizante (NaOCl 0.5%)
7.....	Sustancia de ensayo, inóculo y agente esterilizante
8.....	Sustancia de ensayo, compuesto de referencia e inóculo

Analizar inmediatamente tomando 10 mL de cada frasco y determinar el COD, conforme a la NMX-AA-012-SCFI-2001 (Ver anexos), eliminando pérdidas por evaporación agregando agua.

Evaluar el % de eliminación en la ventana de 10 días,
tomando muestras cada tercer día hasta el día 28.

El porcentaje de degradación se calculará mediante la [ecuación 2](#).



xviii. Producción de CO₂
(Modificado de 301-B OEDC, 1992)

Lavar frascos de 150 mL de capacidad antes de cada prueba (tabla 5).
Utilizando durante el procedimiento agua desionizada o destilada.

Preparación de soluciones stock para medio mineral:

A	<i>KH₂PO₄</i>0.425 g <i>K₂HPO₄</i> 1.08 g <i>Na₂HPO₄·2H₂O</i>1.67 g <i>NH₄Cl</i>0.025 g	Disolver en agua y completar 50 mL pH 7.4
B	<i>CaCl₂</i> 0.275 g ó <i>CaCl₂·2H₂O</i>0.364 g	Disolver en agua y completar 10 mL
C	<i>MgSO₄·7H₂O</i> 0.225 g	Disolver en agua y completar 10 mL
D	<i>FeCl₃·6H₂O</i>0.0025 g	Disolver en agua y completar 10 mL

Nota: Para evitar preparar la solución antes del uso agregar una gota de HCl concentrado por litro.

Preparación de medio mineral: Mezclar 10 mL de solución (A) con 800 mL de H₂O, luego agregar 1 mL de soluciones (B), (C) y (D) completando 1000 mL.

Pre-acondicionamiento del inóculo: En vaso de Pp agregar 5g de sedimento y añadir 8 mL de H₂O para suspender, agitar 15 minutos con agitador magnético y distribuir en cajas Petri, colocar en la incubadora 1 hora a 30-35°C. Transcurrido el tiempo regresar el inóculo a los vasos de Pp y volver a agitar por 15 minutos más, distribuyendo nuevamente en cajas Petri e incubar a la misma T° por 72 h.

Utilizar los siguientes frascos:

1, 2.....	Sustancia de ensayo (muestra) e inóculo (blanco)
3,4.....	Inóculo (sedimento)
5.....	Compuesto de referencia (anilina) e inóculo
6.....	Sustancia de ensayo y agente esterilizante (NaOCl 0.5%)
7.....	Sustancia de ensayo, inóculo y agente esterilizante
8.....	Sustancia de ensayo, compuesto de referencia e inóculo

Evaluar CO₂ en la ventana de 10 días, tomando muestras cada tercer día hasta el día 29.

Analizar inmediatamente tomando 10 mL de cada frasco y determinar CO_{2i}, eliminando pérdidas por evaporación agregando H₂O.

Titular con HCl 0.05 M utilizando fenolftaleína como indicador

El día 28 agregar 1 mL de HCl concentrado a cada frasco y airear para eliminar el CO₂.

El día 29 realizar el último análisis de CO_{2f}.

Calcular el porcentaje de degradación mediante la [ecuación 3 y 4](#).



xix. Sulfatos (SO_4^{2-})
(NMX-AA-074-SCFI-2014)

Transferir a un matraz Erlenmeyer 20 mL de muestra.



Añadir 20 mL del reactivo buffer A o B según sea el caso.



Mezclar con agitador magnético.



Añadir 0.5g de cristales de $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en agitación constante por 1 minuto.



Leer la absorbancia de las muestras a 420 nm.



Calcular la concentración de Sulfatos de acuerdo con los siguientes criterios:

Disolución buffer A: calcular concentración directamente.

Disolución buffer B: restar concentración del blanco, de concentración de muestra.

$$\gamma (\text{SO}_2^{4-}) = \frac{(\alpha(\lambda) - a)}{b}$$

Donde:

b = pendiente.

a = ordenada al origen.

$\alpha(\lambda)$ = absorbancia muestra.

$\gamma(\text{SO}_2^4)$ = concentración ion sulfato (mg/L).