

PROYECTO DE CONSERVACIÓN DE RECURSOS MARINOS EN CENTROAMÉRICA

Convenio de Financiación: (BMZ 2010 66 836)

RESERVA ESTATAL SANTUARIO DEL MANATÍ BAHÍA DE CHETUMAL



INFORME FINAL DEL MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN LA RESERVA ESTATAL SANTUARIO DEL MANATÍ BAHÍA DE CHETUMAL



Responsable técnico: Dra. Teresa Álvarez Legorreta

Marzo 2018

Tabla de contenido

1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS	4
3. MÉTODOS	5
3.1 Área de estudio	5
3.2 Metodología	6
4. RESULTADOS	8
4.1 Evaluación de la calidad del agua	8
4.2 Evaluación de la variación espacio-temporal de los indicadores de la calidad del agua	11
4.3 Evaluación de la condición y estado trófico.....	51
4.4 Identificación y caracterización de las principales fuentes de contaminación	57
4.5 Fortalecimiento del plan de monitoreo de la RESMBCH.....	59
5. DISCUSIÓN	64
6. CONCLUSIONES	66
7. RECOMENDACIONES	67
8. AGRADECIMIENTOS	67
9. REFERENCIAS	67
10. ANEXOS	68

1.- INTRODUCCIÓN

Debido a que las actividades humanas que se desarrollan en torno a los sistemas acuáticos que comprenden la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal (RESMBCH), constituyen un factor determinante en la calidad de sus aguas; el análisis de constituyentes químicos y físicos se ha utilizado para evaluar la condición o el estado de salud en relación con factores de estrés que pueden ser de origen natural o antropogénico, como el enriquecimiento de nutrientes o la presencia de contaminantes químicos. A principios del 2016, El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR)-Unidad Chetumal elaboró un “Diagnóstico de la Calidad del Agua de la Bahía de Chetumal”, a partir de bases de datos de parámetros de calidad del agua generados en programas de monitoreo de la Secretaría de Marina, la Secretaría de Salud del Estado de Quintana Roo y el propio ECOSUR, durante el periodo de 2005 al 2015. El análisis indicó una disminución de la calidad del agua en la bahía en un lapso de 10 años, principalmente en la costa occidental durante las épocas de nortes y lluvias. Se identificaron como principales fuentes de contaminación los aportes del Río Hondo, las escorrentías superficiales de las zonas urbanas y rurales, así como las descargas el drenaje pluvial y el manto freático. Entre las recomendaciones del Diagnóstico destaca la necesidad de implementar un programa de monitoreo permanente de la calidad del agua en la Reserva Estatal para determinar la variabilidad espacial y temporal de los indicadores, que permita contar con bases de datos para la actualización permanente del diagnóstico de la calidad del agua para acciones de saneamiento, conservación y manejo. Por lo que el presente estudio pretende fortalecer el plan de monitoreo que la actual Secretaría de Ecología y Medio Ambiente (SEMA) del estado de Quintana Roo ha implementado de manera parcial, a partir de la evaluación de diversos indicadores de calidad del agua y el entrenamiento en campo y laboratorio de personal de la institución, con el objetivo de mantener el monitoreo a largo plazo como una herramienta en la toma de decisiones para el saneamiento, protección y conservación de la RESMBCH.

2.- OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la calidad del agua y el estado trófico de la Bahía de Chetumal y las lagunas Guerrero, Agua Salada y Chile Verde, para fortalecer el plan de monitoreo actual de la RESMBCH.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Evaluar la calidad del agua de la Bahía de Chetumal y las lagunas Guerrero, Agua Salada y Chile Verde, a partir de doce indicadores fisicoquímicos.
- Evaluar la variación espacial y temporal de los indicadores de calidad de los cuatro cuerpos de agua.
- Evaluar la condición y estado trófico en los cuatro cuerpos de agua.
- Identificar y caracterizar las principales fuentes de contaminación en los cuatro cuerpos de agua, a partir de los indicadores de calidad del agua.
- Fortalecer el plan de monitoreo de la RESMBCH a partir del entrenamiento de personal de la SEMA en la evaluación de indicadores de calidad del agua en campo y laboratorio.

3.- MÉTODOS

3.1.- Área de estudio

La bahía de Chetumal es un sistema estuarino compartido entre los países de México y Belice, que tiene una superficie aproximada de 2,560 km², en dónde la parte norte del sistema forma una cuenca somera con profundidades que oscilan entre 2 y 5 m. Cuenta con varias entradas de agua dulce como el Río Hondo, arroyos pequeños y manantiales subterráneos, y está conectado a varios sistemas de lagunas adyacentes, como la Laguna Guerrero (Carrillo et al., 2009).

La Laguna Guerrero es una cuenca elongada de 8.5 km de longitud y 1.35 km en su parte más ancha, con una profundidad media de 2.22 m y máxima de 6.25 m en el centro del sistema (Alvarez-Legorreta y Carrillo-Briebiezca, 2011). De acuerdo al INEGI (2010) Laguna Chile Verde tiene una longitud aproximada de 21 km y una anchura máxima de 1 km, con una superficie de 11.06 km²; y Laguna Salada presenta una longitud de 9.5 km², una anchura máxima de 1 km y un área de 3.97 km².

Los criterios para la selección del número y localización de los sitios de monitoreo, se basaron en las dimensiones de cada cuerpo de agua y la ubicación de las fuentes potenciales de contaminación debidas a las actividades humanas desarrolladas en el entorno de los cuatro sistemas acuáticos. Así, para la Bahía de Chetumal se eligieron 18 sitios (fig.1), 5 sitios para Laguna Guerrero, 4 sitios para Laguna Chile Verde y 3 sitios para Laguna Agua Salada.

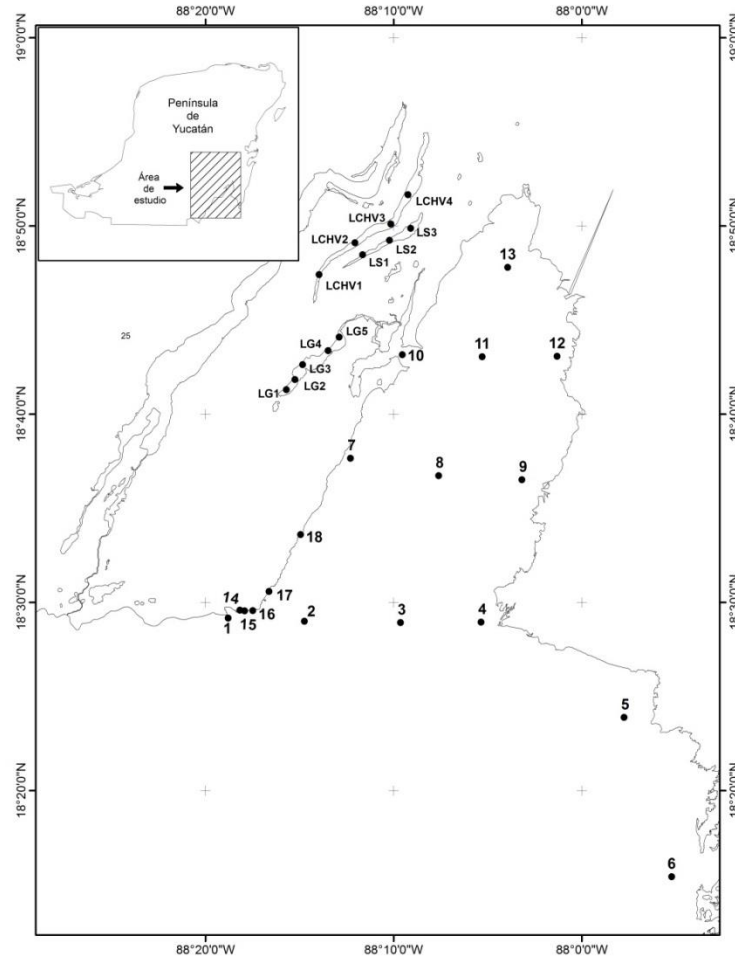


Fig. 1.- Localización de los 30 sitios de monitoreo en los cuatro cuerpos de agua que comprenden la Reserva Estatal Santuario del Manatí Bahía de Chetumal.

3.2.- Metodología

El monitoreo de calidad del agua se realizó en los meses de abril, agosto y noviembre de 2017, que representan las temporadas climáticas de secas, lluvias y nortes, respectivamente. Durante los tres muestreos participó personal de SEMA, con el objetivo de recibir entrenamiento en la colecta de muestras de agua y la medición de parámetros fisicoquímicos *in situ* en la columna de agua de los sistemas monitoreados, por parte de personal de ECOSUR.

Los parámetros fisicoquímicos de pH, temperatura, salinidad, conductividad, oxígeno disuelto y turbidez, se midieron con una sonda multiparamétrica marca HORIBA, modelo U-50; a un metro de profundidad en la columna de agua y dónde

la profundidad era menor a 1m, la medición se realizó a la mitad de la profundidad del sitio.

Para la determinación de los indicadores de calidad del agua: nitratos, nitritos, amonio, ortofosfatos, silicatos y clorofila *a*, las muestras de agua se colectaron con una botella tipo Van Dorn a un metro de profundidad, con tres réplicas por sitio. Las muestras se depositaron en envases de plástico previamente lavados en base a un protocolo del sistema de calidad del laboratorio de ECOSUR, y se conservaron en hielo para ser transportadas para su análisis.

Una vez en el laboratorio de ECOSUR, las muestras fueron filtradas para la determinación de nutrientes disueltos y clorofila *a*. El amonio se evaluó por el método de fenol alcalino e hipoclorito de sodio (EPA, 2001). Los ortofosfatos como fósforo reactivo soluble por el método de azul de molibdeno de Murphy y Riley (1962). El nitrógeno inorgánico como nitritos se determinó por el método de la sulfanilamida y los nitratos se midieron como nitritos después de su reducción en una columna de Cd-Cu (Parson et al., 1984). Los silicatos por el método de molibdato de amonio de Schwartz (1942, en: Contreras, 1994) y la clorofila *a* por el método de extracción con acetona (90%), en filtros Millipore de 0.45 μm de abertura de poro (Parson et al., 1984). Todos los métodos cumplen los estándares de la Entidad Mexicana de Acreditación, para que el Laboratorio de Química de ECOSUR pueda realizar el proceso de acreditación.

Con los datos de nutrientes se obtuvieron dos indicadores de calidad del agua para cada sistema acuático: a) el Índice de Eutrofización de Karydis *et al* (1983), que involucra la concentración total de cada nutriente en un cuerpo de agua y la concentración de cada nutriente que aporta cada sitio de monitoreo, en un período de tiempo determinado; y b) el Índice de Condición a partir de la determinación de los valores de referencia por nutriente en cada laguna (EPA, 1992).

4.- RESULTADOS

Para una mejor comprensión de la información generada durante el período de monitoreo, en las secciones 4.1 a 4.4 se presentan los resultados obtenidos para cada cuerpo de agua.

4.1.- Evaluación de la calidad del agua

En esta sección se describe la calidad del agua de los sistemas acuáticos, a partir de los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos como Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECAs) para la protección de vida acuática para agua dulce y agua salobre o marina, por la entonces Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) en 1989; y que siguen vigentes debido a que no han recibido actualizaciones por la autoridad responsable.

4.1.1.- Bahía Chetumal

En la tabla 1 se observa como la calidad del agua en la bahía de Chetumal de acuerdo a los CECAs para la protección de la vida acuática, es mala para amonio a lo largo del año, debido a que en general su concentración se encuentra por arriba de los LMP en el 100% de los sitios de monitoreo (Fig. 10). Destaca también la concentración de fosfatos (PO_4) durante la época de secas (abril) en la que en el 83% de los sitios es superior al LMP (Fig. 11). Los niveles de nitritos y nitratos son superiores al LMP en un tercio o menos de los 18 sitios a lo largo del año (Fig.8 y9, respectivamente). En tanto que la concentración de oxígeno disuelto (OD) es inferior a la concentración segura para los organismos acuáticos, solo en un sitio durante el mes de noviembre (nortes) (Fig. 4).

Tabla 1.- Comparación de la concentración promedio y desviación estándar de los indicadores de calidad del agua de la Bahía de Chetumal en tres épocas climáticas, con los CECAs (SEDUE, 1989) para aguas marinas o salobres. Los datos en paréntesis se refieren al porcentaje de sitios que superan los LMP.

Indicador	Abril	Agosto	Noviembre	CECAs (Agua marina y salobre)
Nitritos (mg/l)	0.002 ± 0.006 (17%)	0.004 ± 0.004 (33%)	0.003 ± 0.002 (39%)	0.002
Nitratos (mg/l)	0.04 ± 0.06 (33%)	0.04 ± 0.05 (33%)	0.01 ± 0.02 (6%)	0.04
Amonio (mg/l)	0.05 ± 0.03 (100%)	0.06 ± 0.03 (100%)	0.02 ± 0.01 (83%)	0.01
Fosfatos (mg/l)	0.005 ± 0.003 (83%)	0.003 ± 0.002 (22%)	0.002 ± 0.000 (0%)	0.002
Oxígeno Disuelto (mg/l)	8.0 ± 0.6 (0%)	7.5 ± 1.3 (0%)	9.1 ± 1.4 (6%)	5.0

4.1.2.- Laguna Guerrero

Para Laguna Guerrero solamente la concentración de amonio indica una mala calidad del agua (Tabla 2), en dónde supera los LMP para protección de organismos de agua dulce en el 100% de los sitios en la época de secas (abril), en el 60% en lluvias (agosto) y mejora durante la temporada de nortes (noviembre) con solo 1 de 5 sitios con valor superior a los LMP (Fig.22).

Tabla 2.- Comparación de la concentración promedio y desviación estándar de los indicadores de calidad del agua de la Laguna Guerrero en tres épocas climáticas, con los CECAs (SEDUE, 1989) para aguas dulces. Los datos en paréntesis se refieren al porcentaje de sitios que superan los LMP.

Indicador	Abril	Agosto	Noviembre	CECAs (Agua dulce)
Nitritos (mg/l)	0.009 ± 0.003	0.003 ± 0.001	0.007 ± 0.002	-
Nitratos (mg/l)	0.097 ± 0.071	0.004 ± 0.003	0.011 ± 0.003	-
Amonio (mg/l)	0.23 ± 0.06 (100%)	0.07 ± 0.05 (60%)	0.04 ± 0.02 (20%)	0.06
Fosfatos (mg/l)	0.006 ± 0.001 (0%)	0.002 ± 0.001 (0%)	0.002 ± 0.001 (0%)	0.1
Oxígeno Disuelto (mg/l)	8.2 ± 0.9 (0%)	9.3 ± 0.4 (0%)	8.2 ± 0.3 (0%)	5.0

En tanto que los valores de los fosfatos y de OD, se encuentran por debajo de los LMPs (Fig. 23 y 16, respectivamente) indicando así buena calidad del agua. Los CECAs no establecen LMP para nitritos y nitratos, en agua dulce.

4.1.3.- Laguna Chile Verde

Como el sistema anterior, en Laguna Chile Verde solamente el amonio registra concentraciones superiores al LMP para organismos de agua dulce (Tabla 3), y ocurre en los meses de abril (75%) y noviembre (25%) que corresponden a las temporadas de secas y nortes, respectivamente (Fig. 34). Los valores de fosfatos y OD, se encuentran por debajo de los LMPs (Fig. 35 y 28, respectivamente) indicando así buena calidad del agua. Los CECAs no establecen LMP para nitritos y nitratos, en agua dulce.

Tabla 3.- Comparación de la concentración promedio y desviación estándar de los indicadores de calidad del agua de la Laguna Chile Verde en tres épocas climáticas, con los CECAs (SEDUE, 1989) para aguas dulces. Los datos en paréntesis se refieren al porcentaje de sitios que superan los LMP. (LD = Límite Detección)

Indicador	Abril	Agosto	Noviembre	CECAs (Agua dulce)
Nitritos (mg/l)	< LD	0.003 ± 0.000	0.001 ± 0.000	-
Nitratos (mg/l)	0.003 ± 0.004	0.007 ± 0.003	0.006 ± 0.001	-
Amonio (mg/l)	0.06 ± 0.03 (25%)	0.03 ± 0.01 (0%)	0.07 ± 0.02 (75%)	0.06
Fosfatos (mg/l)	0.006 ± 0.002 (0%)	0.002 ± 0.000 (0%)	0.002 ± 0.000 (0%)	0.1
Oxígeno Disuelto (mg/l)	8.3 ± 0.8 (0%)	7.6 ± 0.5 (0%)	10.3 ± 1.5 (0%)	5.0

4.1.4.- Laguna Agua Salada

En este cuerpo de agua salobre la concentración de amonio superó los CECAs en el 100% de los sitios en las tres épocas climáticas (Tabla 4 y fig. 46). Mientras que los indicadores nitritos, nitratos, fosfatos y OD (Figs. 44, 45, 47 y 40, respectivamente) se encuentran dentro de los LMP establecidos para la protección de vida acuática.

Tabla 4.- Comparación de la concentración promedio y desviación estándar de los indicadores de calidad del agua de la Laguna Agua Salada en tres épocas climáticas, con los CECAs (SEDUE, 1989) para aguas marinas o salobres. Los datos en paréntesis se refieren al porcentaje de sitios que superan los LMP. (LD = Límite Detección)

Indicador	Abril	Agosto	Noviembre	CECAs (Agua marina y salobre)
Nitritos (mg/l)	< LD	0.003 ± 0.000 (100%)	0.001 ± 0.000 (0%)	0.002
Nitratos (mg/l)	nd	0.002 ± 0.000 (0%)	0.004 ± 0.005 (0%)	0.04
Amonio (mg/l)	0.09 ± 0.05 (100%)	0.06 ± 0.02 (100%)	0.07 ± 0.03 (100%)	0.01
Fosfatos (mg/l)	0.008 ± 0.002 (100%)	0.002 ± 0.000 (0%)	0.001 ± 0.000 (0%)	0.002
Oxígeno Disuelto (mg/l)	7.8 ± 1.2 (0%)	6.8 ± 1.6 (0%)	9.9 ± 0.7 (0%)	5.0

4.2.- Evaluación de la variación espacio-temporal de los indicadores de la calidad del agua.

En esta sección se analiza el comportamiento espacial y temporal de los 6 parámetros fisicoquímicos y los 6 indicadores de calidad del agua medidos en cada sistema acuático.

4.2.1.- Bahía de Chetumal

4.2.1.1.- Fisicoquímicos:

Temperatura.-

En el análisis espacial se observa que los sitios 1, 12, 10, 14, 15, 16, 17 y 18, presentaron el valor promedio anual más alto (>29°C), con respecto a los demás sitios (Fig. 2a), pero estas diferencias no son estadísticamente significativas. Las diferencias espaciales podrían deberse a que estos sitios localizados cerca de la costa occidental de la bahía presentan baja profundidad y la influencia de las descargas de aguas pluviales con mayor temperatura al circular por el pavimento de la ciudad.

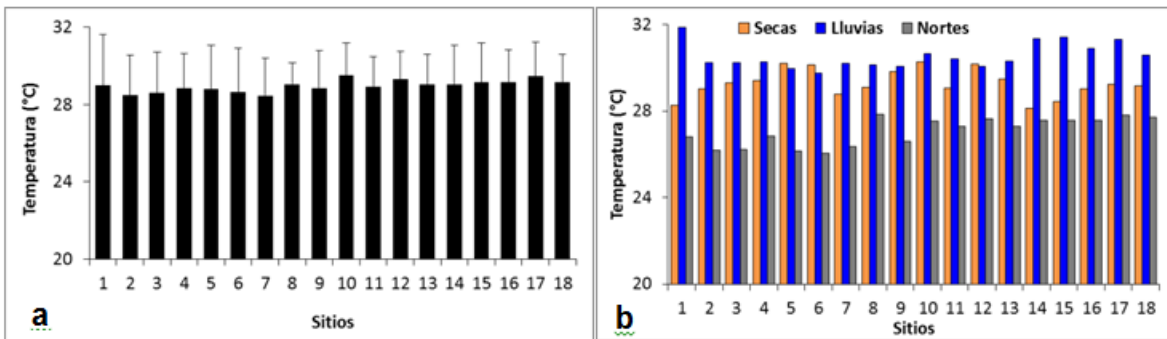


Fig.2.- Valores de temperatura anual promedio (a) y por época climática en la columna de agua (b) de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017.

El mes de agosto (lluvias) fue el que registró las temperaturas más altas en la columna de agua ($30.55\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.60$), seguido de la época de secas (abril) con $29.29\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.65$. En el mes de noviembre (nortes) se registró la temperatura promedio más baja de $27.07\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.65$ (Fig. 2b).

pH.-

Los sitios 10, 11, 12 y 13 registraron valores promedio anual de pH más altos de 8.43, 8.22, 8.44 y 8.45, respectivamente (Fig. 3a), sin embargo no existe diferencia estadística significativa entre sitios, debido a la alta variabilidad entre épocas climáticas.

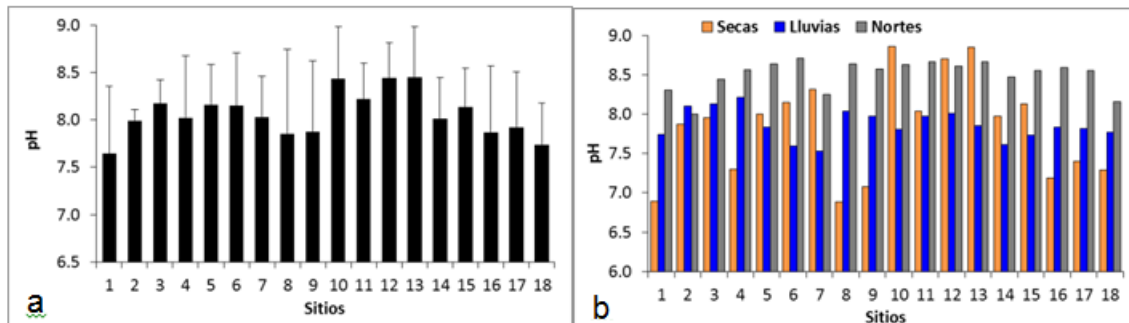


Fig.3.- Valores de pH anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017.

Durante el mes de noviembre (nortes) se registró el valor promedio más alto de pH de 8.50 ± 0.20 , y en los meses de abril (secas) y agosto (lluvias) los valores promedio fueron de 7.83 ± 0.64 y 7.86 ± 0.20 , respectivamente (Fig. 3b); no

obstante, estas diferencias no son significativas, y estos valores son considerados normales para cuerpos de agua salobres como la Bahía de Chetumal.

Oxígeno Disuelto.-

En todo el sistema se registraron valores promedio anual de oxígeno disuelto superiores al límite mínimo establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática que es de 5 mg/l (Fig. 4 a y b), con excepción del sitio 1 (río Hondo) durante la época de nortes, que registró un valor de 4.65 mg/l (Fig. 4b).

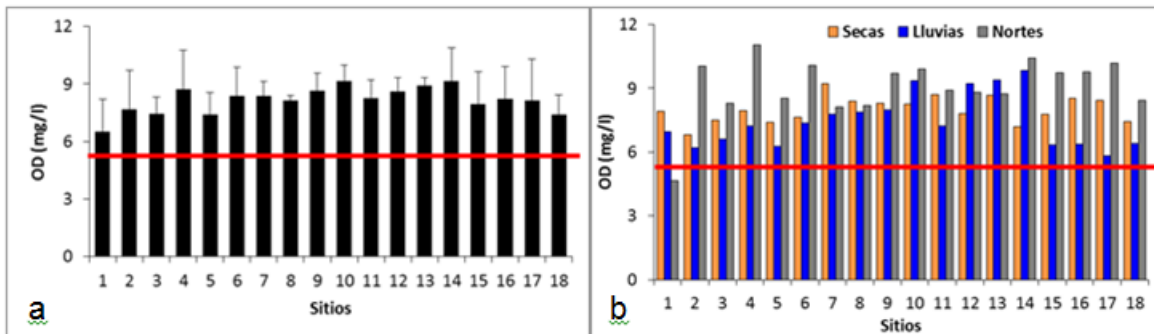


Fig.4.- Valores de oxígeno disuelto (OD) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática.

Durante la temporada de nortes (noviembre) se registró el valor promedio más alto de OD (9.08 mg/l ± 1.41), probablemente debido a que los vientos que caracterizan ésta época permiten la saturación de oxígeno en la columna de agua. Seguido de los meses de abril (secas) y agosto (lluvias) con una concentración promedio de 7.99 mg/l ± 0.61 y 7.45 mg/l ± 1.26, respectivamente (Fig. 4b).

Turbidez.-

Este parámetro es el que presentó la mayor variabilidad espacial y temporal en la bahía de Chetumal, por la resuspensión de sedimentos a la columna de agua provocada por la acción de oleaje, corrientes, vientos y escurrimientos de la línea de costa. Así, el valor promedio anual fue mayor en el sitio 1 (25.7 NTU ± 24.3) por la descarga de agua del río Hondo, así como en los sitios 14 al 18 que tienen influencia de las descargas pluviales y escurrimientos de la ciudad de Chetumal y

el poblado de Calderitas ($33.2 \text{ NTU} \pm 34.9$, $44.3 \text{ NTU} \pm 52$, $59.2 \text{ NTU} \pm 51.2$ y $43.4 \text{ NTU} \pm 46.4$, respectivamente) (Fig. 5a).

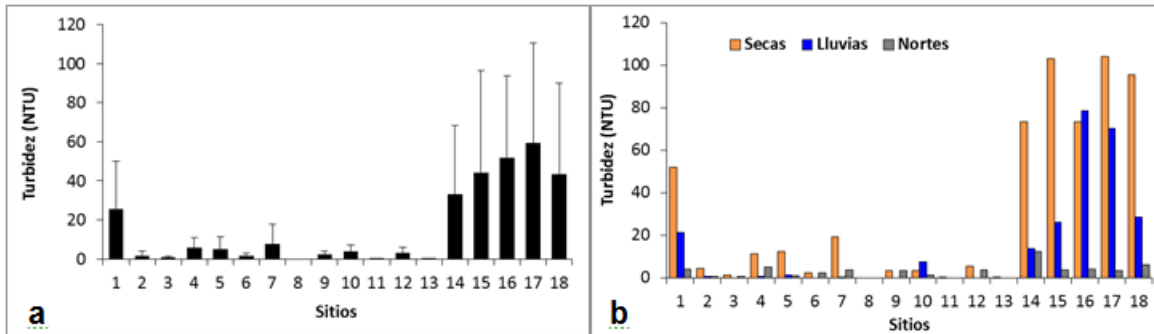


Fig.5.- Valores de turbidez anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017.

En el comportamiento temporal se observa que la mayor turbidez se registró durante la época de secas (abril) con un valor promedio de $31.3 \text{ NTU} \pm 39.9$, seguido de la época de lluvias ($13.8 \text{ NTU} \pm 24.1$), en tanto que la menor turbidez se observó durante la época de nortes ($3.1 \text{ NTU} \pm 3.0$). De acuerdo al comportamiento espacial de la turbidez para las tres temporadas, los principales factores que provocan el aumento de sólidos suspendidos en la columna de agua son las descargas pluviales y los escurrimientos provenientes de la zona agrícola de río Hondo y de los asentamientos humanos de Chetumal y Calderitas (Fig. 5b).

Salinidad.-

El comportamiento espacial de la salinidad es el que se espera para un cuerpo de agua con influencia de agua dulce y salada. Así, los valores de salinidad más altos se registraron en los sitios 2 al 13 que tienen una fuerte influencia de la entrada de agua marina por el Canal de Zaragoza en su costa oriental, así como del canal de comunicación con el Mar Caribe al sur del sistema, que van de $12.1\% \pm 1.5$ (sitio 10) a $17.8\% \pm 5.1$ en el sitio 6. En tanto que los más bajos se registraron en el sitio 1 frente a río Hondo ($2.7\% \pm 2.3$) y de $5.3\% \pm 3.2$ en el sitio 14, que se localiza cerca del canal pluvial cercano al Parque Renacimiento (Fig. 6a).

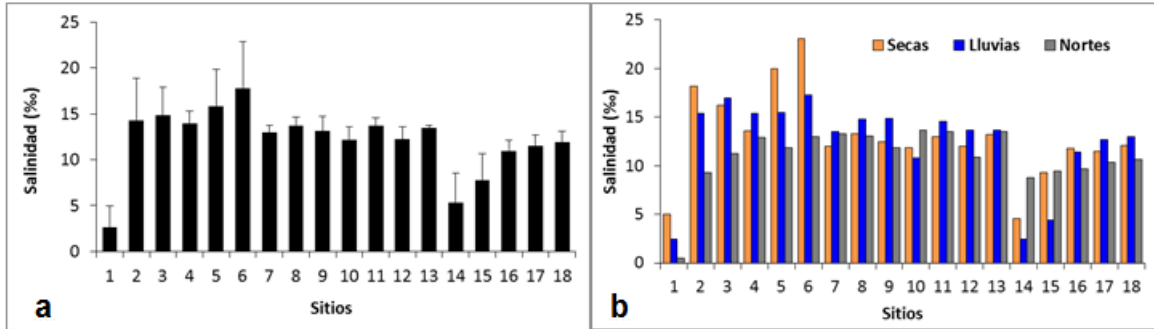


Fig.6.- Valores de salinidad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017.

La salinidad promedio en el sistema fue mayor en la temporada de secas ($13.0\text{ ‰} \pm 4.5$), principalmente debido a los sitios 2 al 6 que se localizan en la región sur con fuerte influencia marina, que disminuye hacia la época de lluvias ($12.4\text{ ‰} \pm 4.6$) y nortes ($11.0\text{ ‰} \pm 3.1$) por el aporte de agua dulce del río Hondo (sitio 1) y los sitios cercanos a la costa con descargas pluviales (sitios 14 y 15) (Fig. 6b).

Conductividad.-

Este parámetro presenta el mismo comportamiento espacial y temporal que la salinidad, debido a que la conductividad es sensible a las variaciones en sólidos disueltos, principalmente sales minerales (Chapman, 1996). Así, los sitios 1 y 14 registran los valores promedio más bajos ($4.9\text{ mS/cm} \pm 3.9$ y $9.4\text{ mS/cm} \pm 5.3$, respectivamente), y los más altos en los sitios 2 al 6, con valores de $23.1\text{ mS/cm} \pm 2.0$ a $28.8\text{ mS/cm} \pm 7.5$ (Fig. 7a).

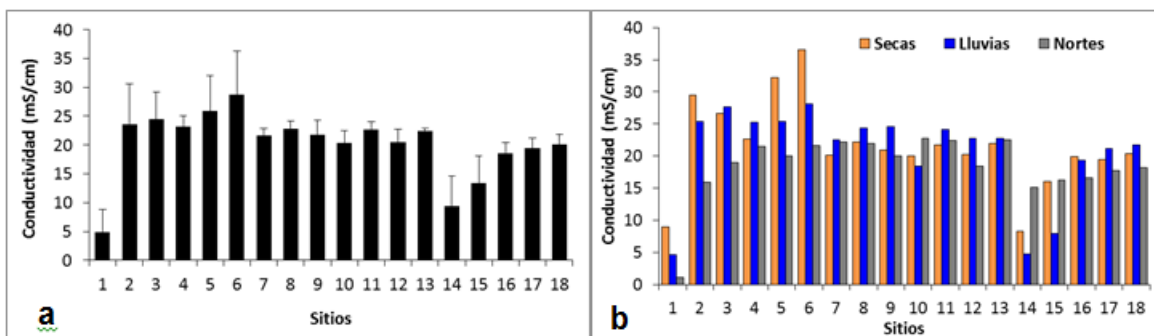


Fig.7.- Valores de conductividad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017.

La época de secas (abril) registró el valor promedio más alto (21.5 mS/cm \pm 6.91) debido a los sitios 2 al 6, observándose una disminución de la conductividad en las épocas de lluvias y nortes (20.6 mS/cm \pm 7.30 y 18.5 mS/cm \pm 5.02, respectivamente) por el aporte de agua dulce de los sitios 1, 14 y 15 (Fig. 7b).

4.2.1.2.-Nutrientes:

Nitritos.-

En la mayor parte de la bahía de Chetumal la concentración promedio anual de nitritos fue muy baja y cercana al límite de detección del método analítico (0.0001 mg/l). Destacando los sitios 14 al 18 que se localizan frente a la ciudad de Chetumal (Fig. 8a) con valores que superan el LMP de 0.002 mg/l establecido por los CECAs para la protección de vida acuática de agua salobre (Fig. 1).

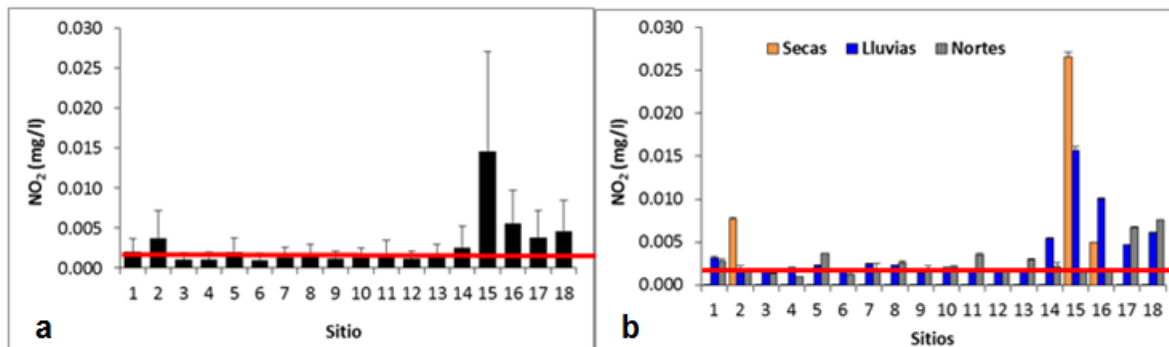


Fig.8.- Valores de nitritos (NO₂) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

No obstante que en la época de secas los sitios 2 (0.008 mg/l \pm 0.0002) y 15 (0.027 mg/l \pm 0.001) registraron las concentraciones más altas de las tres temporadas, el promedio para la temporada fue el más bajo (0.002 mg/l \pm 0.006), debido a que en la mayor parte del sistema las concentraciones fueron menores a 0.0001 mg/l. En la época de lluvias (agosto) se obtuvo la concentración promedio mayor (0.004 mg/l \pm 0.004), en donde los sitios 14 a 18 registraron los valores más

altos. En tanto que la temporada de nortes (noviembre) se registró un valor promedio de nitritos de $0.003 \text{ mg/l} \pm 0.002$ (Fig. 8b).

Nitratos.-

Los sitios 1, 14, 15 y 18 presentaron la concentración promedio anual más alta con valores de $0.13 \text{ mg/l} \pm 0.08$, $0.11 \text{ mg/l} \pm 0.09$, $0.09 \text{ mg/l} \pm 0.07$ y $0.05 \text{ mg/l} \pm 0.01$, respectivamente (fig. 9a), que sobrepasan el LMP de los CECAs para la protección de la vida acuática de 0.04 mg/l (línea roja). El sitio 1 se localiza frente a la desembocadura del río Hondo y los otros tres frente a la ciudad de Chetumal (Fig.1). En el resto de los sitios alejados de la costa occidental, presentan bajas concentraciones.

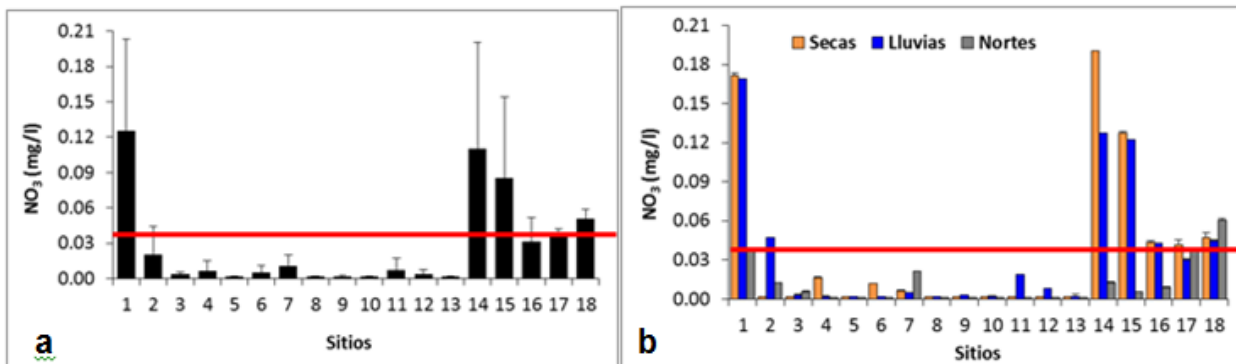


Fig.9.- Valores de nitratos (NO₃) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

La concentración promedio fue similar en las temporadas de secas y lluvias con valor de $0.04 \text{ mg/l} \pm 0.06$, en dónde los sitios 1, 14, 15, 16 y 18 superaron el LMP de 0.04 mg/l de los CECAs, en ambas épocas climáticas (línea roja, Fig. 9b). En tanto que el mes de noviembre (nortes) registró el valor promedio más bajo ($0.01 \text{ mg/l} \pm 0.02$), en dónde los sitios 4 al 13 localizados hacia el centro del sistema (Fig. 1) tuvieron valores menores al límite de detección del método ($< 0.002 \text{ mg/l}$). Destaca el sitio 18 frente al poblado de Calderitas debido a que mantiene concentraciones superiores al LMP de los CECAs en las tres épocas climáticas.

Amonio.-

El caso del amonio es particular, debido a que en todo el sistema las concentraciones fueron superiores al LMP de 0.01 mg/l, establecidos por los CECAs para la protección de la vida acuática (línea roja, Fig. 10a). Todos los sitios presentaron valores similares, con excepción del 12 localizado en el norte de la costa oriental de la bahía de Chetumal, y el 15 ubicado frente a la ciudad de Chetumal (Fig. 1). La elevada concentración en el sitio 15 se explicaría por las descargas de aguas pluviales y los escurrimientos superficiales durante la temporada de lluvias, mientras que el sitio 12 podría ser un sitio de acumulación de materia orgánica, en dónde el amonio es producto de su descomposición o mineralización.

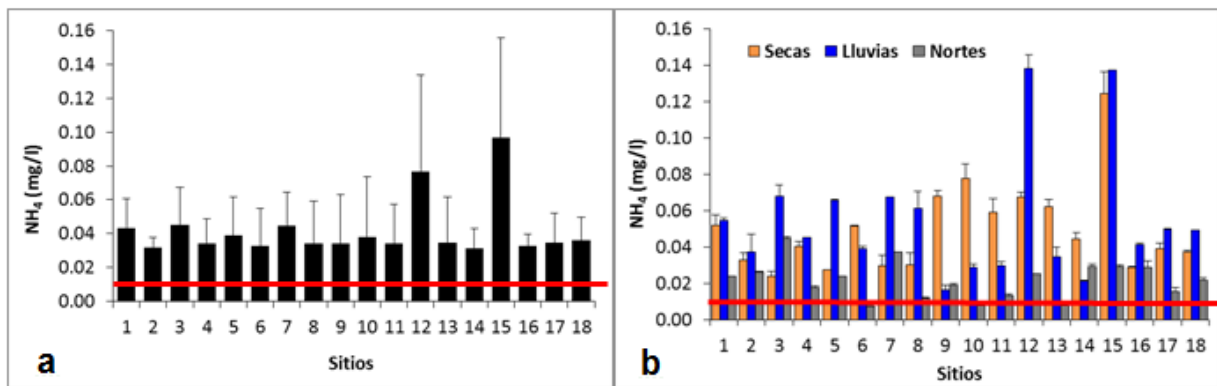


Fig.10.- Valores de amonio (NH₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

El mes de agosto (lluvias) presentó la concentración promedio mayor (0.06 mg/l ± 0.03), seguido del mes de abril (secas) con un valor de 0.05 mg/l ± 0.03, y el mes con concentración más baja fue noviembre (nortes) con 0.02 mg/l ± 0.01. Durante las tres épocas climáticas los niveles de amonio se mantuvieron por arriba del LMP para la protección de la vida acuática (línea roja, Fig. 10b) en todo el sistema, sin embargo es importante destacar que el origen del amonio parece ser diferente en los sitios de acuerdo a la temporada del año.

Así en los sitios 6, 9, 10, 11, 13 y 14 las mayores concentraciones se registran durante la época de secas. Para el sitio 14 la fuente podría ser el canal pluvial que

se encuentra cerca del Parque Renacimiento y que se mantiene con agua todo el tiempo. En el sitio 10 podría deberse a su comunicación con la Laguna Guerrero a través de canales que pueden tener un alto contenido de materia orgánica en descomposición, mientras que en los sitios 6, 9, 11 y 13 el origen podría ser la entrada de agua subterránea con alto contenido de amonio y producto de la descomposición de materia orgánica en los sedimentos (Fig. 1). Mientras que en el resto de los sitios las altas concentraciones se registran durante la temporada de lluvias, en dónde los escurrimientos superficiales predominan sobre las entradas de agua subterránea.

Fosfatos.

Los fosfatos presentaron una gran variabilidad espacial y temporal en su concentración, sin embargo en la mayoría de los sitios su concentración promedio anual fue superior al LMP para la protección de la vida acuática de aguas salobres establecida por los CECAs de 0.002 mg/l (línea roja, Fig. 11a). La concentración más alta (0.005 mg/l ± 0.005) se registró en los sitios 3 y 7, seguido de los sitios 4 y 15 con 0.004 mg/l ± 0.004. Estos sitios con excepción del 15 se encuentran alejados de asentamientos humanos.

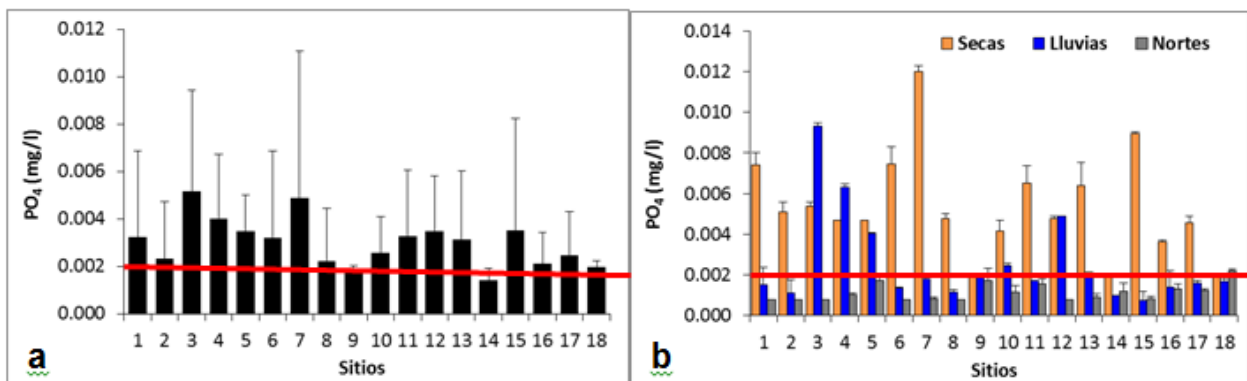


Fig.11.- Valores de fosfatos (PO₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

La temporada de secas (abril) se caracterizó por presentar la mayor concentración promedio (0.005 mg/l ± 0.003), seguida de la época de lluvias (agosto) con 0.003

mg/l \pm 0.002. En noviembre (nortes) todo el sistema presentó valores iguales o menores al límite de detección que es de 0.002 mg/l. Durante la época de secas todos los sitios con excepción del 9, 14 y 18, sobrepasaron el LMP para la protección de la vida acuática de 0.002 mg/l, destacando por su concentración los sitios 7 (0.012 mg/l), 15 (0.009 mg/l), 1 y 11 (ambos con 0.007 mg/l). Mientras que en la temporada de lluvias solo los sitios 3, 4, 5 y 12 tuvieron valores superiores al LMP de los CECAs (línea roja, Fig. 11b), con los valores más altos en los sitios 3 (0.009 mg/l) y 4 (0.006 mg/l).

El origen de las altas concentraciones durante la temporada de lluvias podría ser la descarga de agua del río Hondo rica en nutrientes por el uso de fertilizantes en las zonas agrícolas de las riberas de México y Belice durante esta temporada, así como la entrada de agua subterránea. Para la época de lluvias es posible que la fuente de fosfatos sea el aumento del caudal del río Hondo, que transporta materia orgánica proveniente de las escorrentías de las zonas agrícolas hacia sitios más profundos dónde se deposita y se descompone.

Silicatos. -

Los silicatos presentaron alta variabilidad temporal y baja variabilidad espacial. La concentración promedio anual más alta de silicatos se registró en los sitios 1 (6.48 mg/l \pm 2.84), 14 (5.82 mg/l \pm 3.42), 15 (5.42 mg/l \pm 2.73) y 10 (5.01 mg/l \pm 3.34) (Fig. 12a). Debido a que el agua subterránea es rica en silicatos, se ha utilizado como un indicador de la entrada de agua subterránea a cuerpos de agua superficiales, como los que componen la Reserva Estatal del Santuario del Manatí. Por lo que el origen de las altas concentraciones de silicatos en estos sitios, se debe a la descarga de agua del río Hondo y las entradas de agua subterránea cercanas a la costa occidental de la bahía de Chetumal.

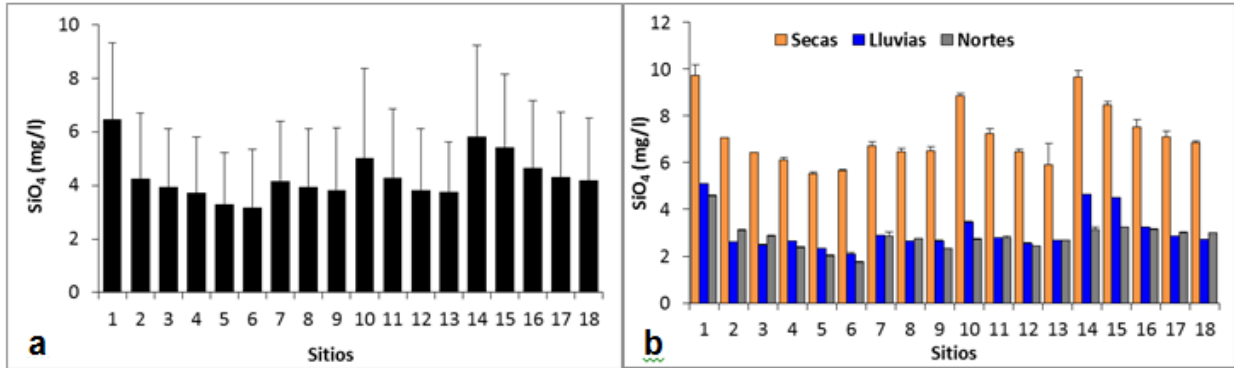


Fig.12.- Valores de silicatos (SiO₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017.

La época de secas (abril) registró la concentración promedio mayor (7.1 mg/l ± 1.3), seguida de la temporada de lluvias (agosto) con 3.1 mg/l ± 0.8, y la más baja se presentó en noviembre (nortes) con 2.8 mg/l ± 0.6. En el mes de abril los sitios con la concentración más alta fueron nuevamente 1 y 14 (ambos con 9.7 mg/l), 10 (8.8 mg/l) y 15 (8.5 mg/l), cuyo origen es el mencionado en el párrafo de arriba. Durante los meses de agosto y noviembre disminuye la concentración de silicatos debido al aumento de la entrada de agua dulce de las lluvias, que provoca un efecto de dilución de los silicatos provenientes de la entrada de agua subterránea. Sin embargo se observa que se mantienen los niveles más altos de este elemento en los sitios 1, 10, 14 y 15 (Fig. 12b).

Clorofila a.-

La clorofila a también presentó gran variabilidad espacial y temporal. La concentración más alta de este indicador de productividad primaria, se registró principalmente en los sitios 4 (3.4 µg/l ± 2.3), 18 (3.3 µg/l ± 2.4), 15 µg/l ± 2.5), 14 (3.2 (2.9 µg/l ± 1.6) y 7 (2.8 µg/l ± 1.2) (Fig. 13a). Los sitios 14 y 15 se localizan frente a la ciudad de Chetumal, el 18 frente al poblado de Calderitas, el 7 cerca de la Isla de Tamalcab y el 4 en la costa oriental de la bahía de Chetumal (Fig. 1). La alta productividad primaria en el sitio 4 se relaciona con altos valores de amonio y fosfatos, mientras que para los sitios 7, 14, 15 y 18 con altos valores de nitratos y amonio.

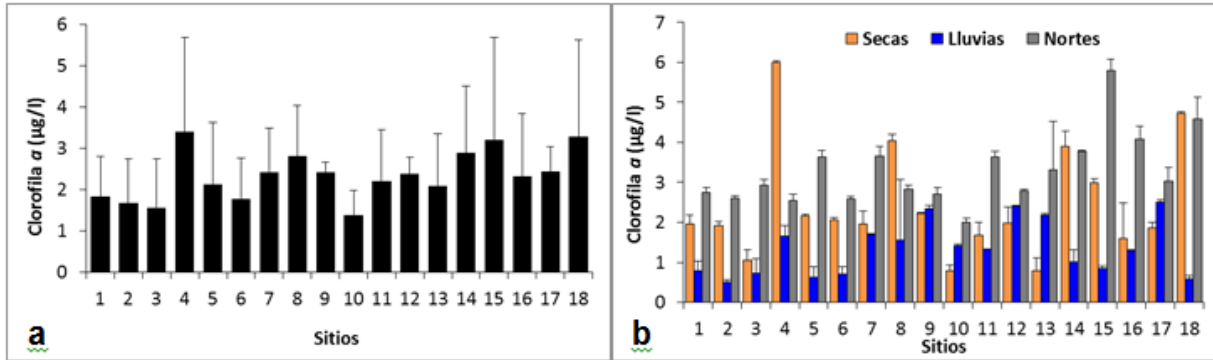


Fig.13.- Valores de clorofila a anual promedio y por época climática en la columna de agua de los 18 sitios monitoreados en la Bahía de Chetumal durante 2017.

Para este parámetro la concentración promedio más alta se presentó en la época de nortes (noviembre) con un valor de $3.3 \mu\text{g/l} \pm 0.9$, seguida de la época de secas (abril) con $2.4 \mu\text{g/l} \pm 1.4$ y de lluvias (agosto) con $1.3 \mu\text{g/l} \pm 0.7$. Estos resultados indican que la resuspensión de sedimentos con alto contenido de nutrientes, podría ser la causa de las altas concentraciones de clorofila a durante esta temporada. En la temporada de secas la fuente principal de nutrientes a la bahía de Chetumal es el agua subterránea, mientras que en la época de lluvias son los escurrimientos superficiales debidos a la precipitación pluvial.

En noviembre los sitios con mayor concentración de clorofila a fueron el 15 ($5.8 \mu\text{g/l} \pm 0.3$), 18 ($4.6 \mu\text{g/l} \pm 0.6$), 16 ($4.1 \mu\text{g/l} \pm 0.3$) y 14 ($3.8 \mu\text{g/l} \pm 0.02$). En abril fueron el 4 ($6 \mu\text{g/l} \pm 0.04$), 18 ($4.7 \mu\text{g/l} \pm 0.05$) 8 ($4 \mu\text{g/l} \pm 0.2$) y 14 ($3.9 \mu\text{g/l} \pm 0.4$); y en agosto el 17 ($2.5 \mu\text{g/l} \pm 0.1$), 12 y 9 ($2.4 \mu\text{g/l} \pm 0.04$) y 13 ($2.2 \mu\text{g/l} \pm 0.04$) (Fig. 13b).

4.2.2.- Laguna Guerrero

4.2.2.1.- Fisicoquímicos:

Temperatura.-

Ese indicador tuvo un comportamiento espacial uniforme en toda la Laguna Guerrero, con diferencias significativas solo entre épocas climáticas. Así, en todo el sistema la concentración promedio fue de $29.3 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0.2$ (Fig. 14 a).

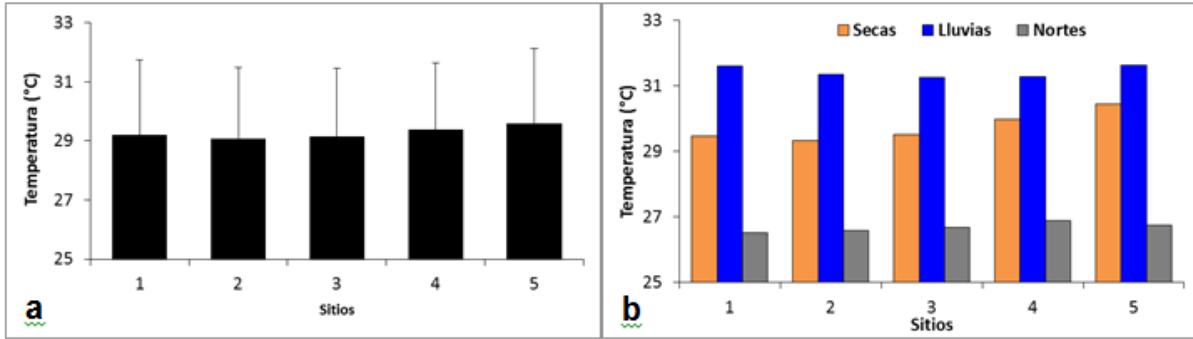


Fig.14.- Valores de temperatura anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017.

Es interesante que para este sistema, la temporada de lluvias (agosto) presentó un valor promedio mayor ($31.4\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2$) que la temporada de secas (abril) que fue de $29.7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5$; mientras que como se esperaba en la época de nortes (noviembre) se registró la temperatura más baja en la columna de agua ($26.7\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.1$) (Fig. 14b).

pH.-

En el caso del pH no se observó variabilidad espacial ni temporal significativa en este sistema acuático. Sin embargo, el valor promedio anual de pH fue mayor en los sitios 4 (8.4 ± 0.8) y 5 (8.3 ± 0.7) y el más bajo en el sitio 1 (7.6 ± 0.3) (Fig. 15a).

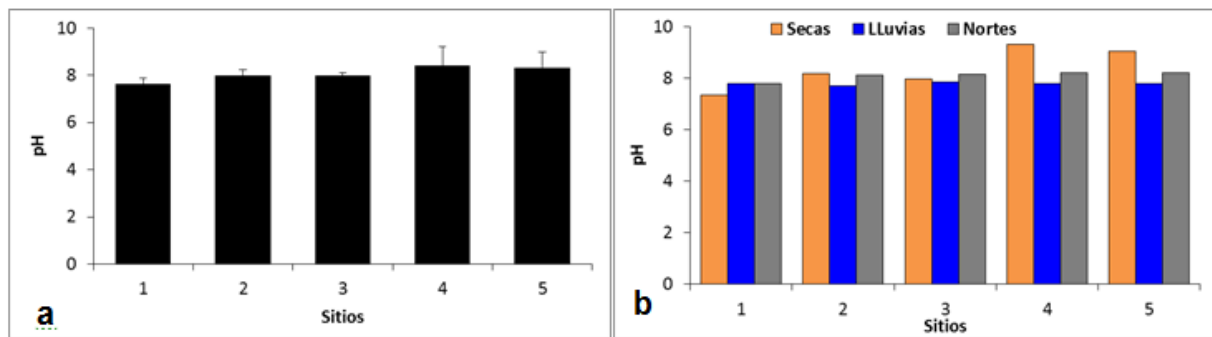


Fig.15.- Valores de pH anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017.

Como se observa en la figura 15b, el valor más alto de pH se registró en la época de secas (8.4 ± 0.8), en dónde destacan los sitios 4 y 5 con valores de 9.3 y 9.0, respectivamente. Le sigue la temporada de nortes (8.1 ± 0.2), con valores de 8.2

en todo el sistema con excepción del sitio 1 que registró un valor de 7.8; mientras que en lluvias el valor promedio fue de 7.8 ± 0.1 , en todo el sistema. Se considera que valores de pH entre 6.0 y 8.5 son los normales en un cuerpo de agua natural (Chapman, 1996).

Oxígeno Disuelto.-

De acuerdo al límite mínimo de 5 mg/l, establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática, Laguna Guerrero mantuvo durante el período de monitoreo una buena oxigenación de la columna de agua (Fig. 16 a y b). En dónde los sitios 1 y 3 registraron la concentración promedio más alta con $9.0 \text{ mg/l} \pm 0.7$, y el valor más bajo se presentó en el sitio 2 (8.0 ± 1.3).

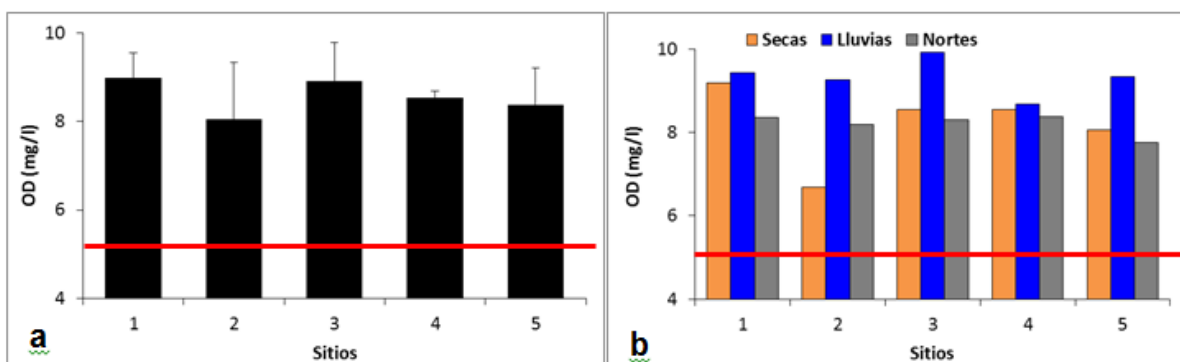


Fig.16.- Valores de oxígeno disuelto (OD) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática.

Durante la temporada de lluvias (agosto) se registró la concentración promedio de oxígeno disuelto más elevada ($9.3 \text{ mg/l} \pm 0.4$), seguida de las épocas de secas ($8.2 \text{ mg/l} \pm 0.9$) y nortes ($8.2 \text{ mg/l} \pm 0.3$). En lluvias el valor más alto lo presentó el sitio 3 (9.9 mg/l), en secas se observó en el sitio 1 (9.2 mg/l) y en nortes en los sitios 1 y 4 (8.4 mg/l). La concentración más baja durante todo el período del estudio se registró en el sitio 2 (6.7 mg/l) en la temporada de secas (Fig. 16b).

Turbidez.-

En el muestreo del mes de agosto (lluvias) en la Laguna Guerrero, el sensor de la sonda multiparamétrica marcaba un error, por lo que no se registraron datos para

esta temporada. Con respecto a las otras dos épocas climáticas, la turbidez presentó gran variabilidad espacial y temporal en el sistema. El valor promedio más alto lo registraron los sitios 2 ($1.7 \text{ NTU} \pm 1.6$), 1 ($1.5 \text{ NTU} \pm 1.5$) y 3 ($1.4 \text{ NTU} \pm 1.3$) (Fig. 17a).

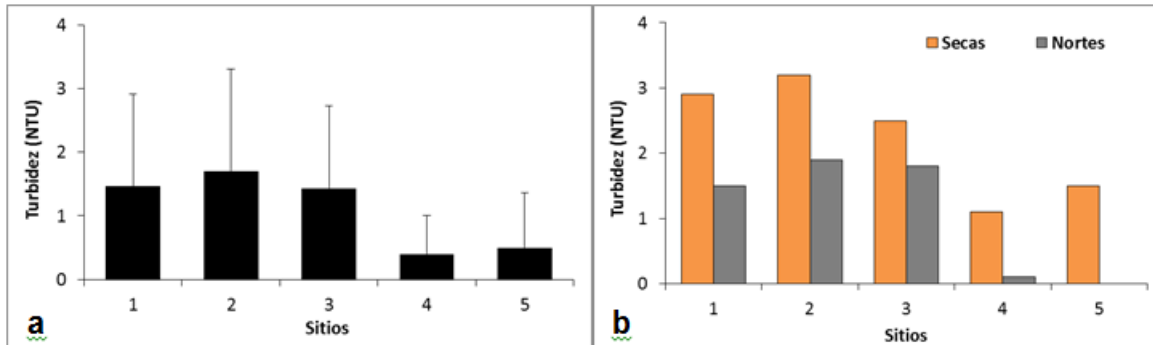


Fig.17.- Valores de turbidez anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017.

En la temporada de secas (abril) se registró el valor promedio más alto ($2.2 \text{ NTU} \pm 0.9$), destacando los sitios 2 (3.2 NTU), 1 (2.9 NTU) y 3 (2.5 NTU). En relación con la época de nortes (noviembre) el valor promedio fue de $1.1 \text{ NTU} \pm 0.9$, en dónde los sitios 2 (1.9 NTU), 3 (1.8 NTU) y 1 (1.5 NTU) presentaron los valores más altos (Fig. 17b).

Los sitios 1, 2 y 3 se localizan frente a los poblados de Luis Echeverría y Raudales, en dónde las diversas actividades humanas podrían estar contribuyendo a un alto contenido de partículas suspendidas en la columna de agua, dando como resultado valores elevados de turbidez.

Salinidad.-

En la Laguna Guerrero se observó a nivel espacial un gradiente de salinidad de menor a mayor concentración, con dirección de sur a norte; en dónde el sitio 1 registró el valor promedio anual menor (3.7 ‰) y el sitio 5 el más alto con 4.5 ‰ (Fig. 18a).

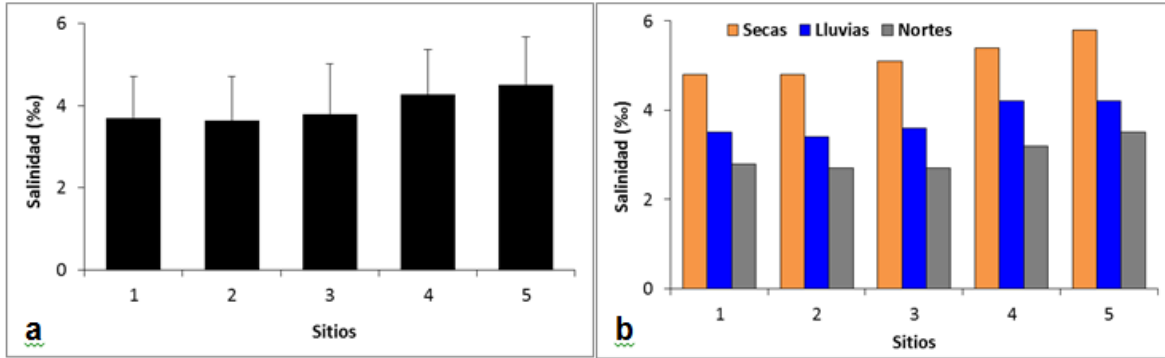


Fig.18.- Valores de salinidad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017.

En la escala temporal la salinidad promedio más alta se registró en la época de secas (abril) con $5.2 \text{ ‰} \pm 0.4$, seguido de la temporada de lluvias con $3.8 \text{ ‰} \pm 0.4$ y la de nortes (noviembre) la de salinidad menor con $3.0 \text{ ‰} \pm 0.4$ (Fig. 18b). En las tres épocas climáticas se observó el mismo comportamiento espacial del gradiente de salinidad de menor a mayor concentración de sur a norte.

Conductividad.-

Este parámetro presenta el mismo comportamiento espacial y temporal que la salinidad, debido a que la conductividad es sensible a las variaciones en sólidos disueltos, principalmente sales minerales (Chapman, 1996). Así, en la laguna se observa el mismo gradiente de sur a norte, con el valor promedio anual más bajo de conductividad en el sitio 1 ($6.8 \text{ mS/cm} \pm 1.7$) y el más alto en el sitio 5 con $8.1 \text{ mS/cm} \pm 2.0$ (Fig. 19a).

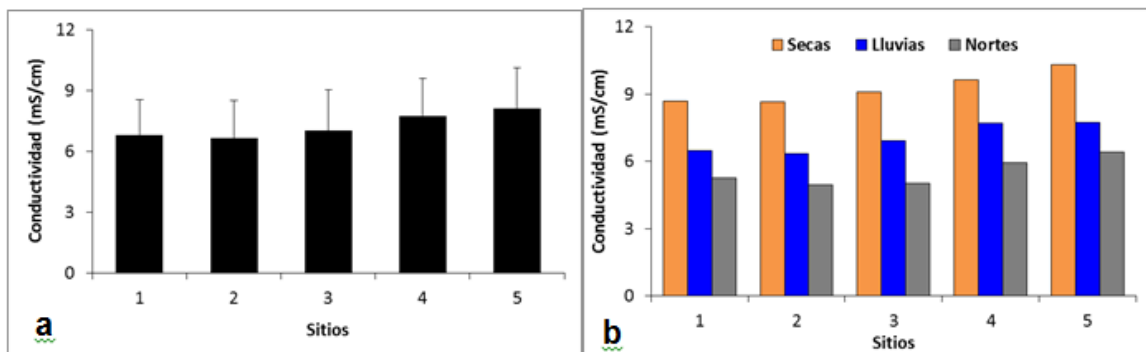


Fig.19.- Valores de conductividad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017.

El comportamiento temporal de la conductividad también es el mismo que el de la salinidad. Así, el valor más alto se registró en la época de secas (abril) con $9.3 \text{ mS/cm} \pm 0.7$, seguido de la temporada de lluvias (agosto) con $7.0 \text{ mS/cm} \pm 0.7$ y el valor menor en la época de nortes (noviembre) con $5.5 \text{ mS/cm} \pm 0.6$. Con el mismo gradiente espacial en las tres temporadas de monitoreo (Fig. 19b).

4.2.2.2. Nutrientes:

Para cuerpos de agua dulce solo se establecen criterios ecológicos de calidad del agua (CECAs) para amonio y fosfatos.

Nitritos.-

Los nitritos presentaron alta variabilidad temporal y menor variabilidad espacial. La concentración promedio anual mayor se registró en los sitios 2 ($0.008 \text{ mg/l} \pm 0.005$), 3 ($0.007 \text{ mg/l} \pm 0.004$) y 1 ($0.006 \text{ mg/l} \pm 0.006$) (Fig. 20a). El sitio 2 se encuentra cerca del puente de Raudales, el sitio 3 frente al poblado del mismo nombre y el sitio 1 frente cerca del poblado de Luis Echeverría.

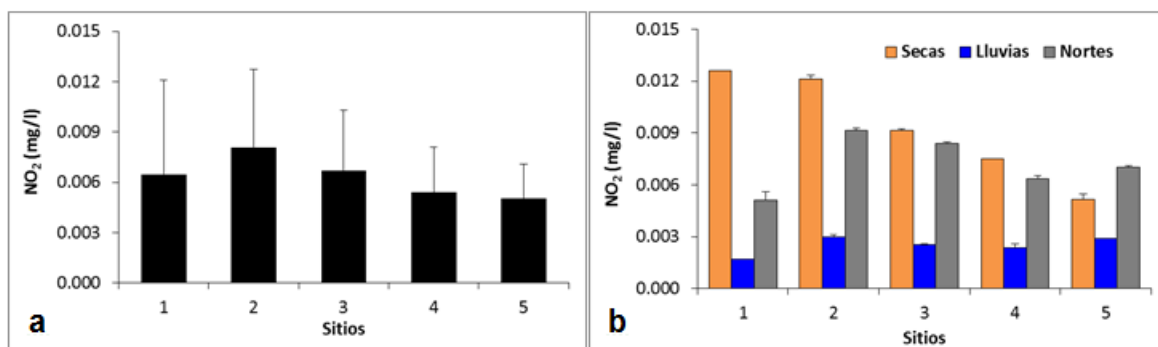


Fig.20.- Valores de nitritos (NO₂) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017.

El mes de abril (secas) registró la concentración mayor de nitritos ($0.009 \text{ mg/l} \pm 0.003$), seguida del mes de noviembre (nortes) con $0.007 \text{ mg/l} \pm 0.002$ y la más baja en agosto (lluvias) con $0.003 \text{ mg/l} \pm 0.001$. Durante la temporada de secas se observa un gradiente de mayor a menor concentración, de sur a norte de la

laguna, en dónde el sitio 1 presentó un valor de 0.013 mg/l y el sitio 5 de 0.005. Para la época de nortes el gradiente se observó solamente del sitio 2 (0.009 mg/l) al sitio 4 (0.006 mg/l), mientras que para la temporada de lluvias las concentraciones fueron más homogéneas en todo el sistema con valores menores a 0.003 mg/l (Fig. 20b).

Para este parámetro la fuente principal parecen ser las filtraciones de aguas residuales de los poblados de Raudales y Luis Echeverría, así como la resuspensión de sedimentos ricos en materia orgánica, durante la época de nortes.

Nitratos.

Los nitratos presentaron alta variabilidad espacial y temporal. Para este indicador las concentraciones promedio anual más altas se registraron en los sitios 4 (0.07 mg/l \pm 0.11) y 5 (0.05 mg/l \pm 0.09) (Fig. 21a), localizados al norte de la laguna en dónde hay algunos asentamientos humanos dispersos.

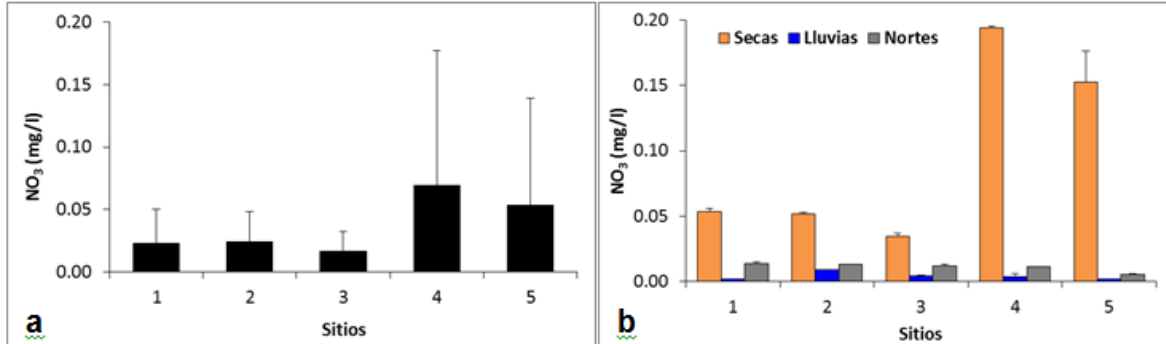


Fig.21.- Valores de nitritos (NO₃) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017.

La temporada de secas (abril) registro la concentración promedio mayor (0.10 mg/l \pm 0.07), seguida de la época de nortes (noviembre) con 0.01 mg/l \pm 0.003), y la más baja en la temporada de lluvias (agosto) con 0.004 mg/l \pm 0.003. En secas los niveles más altos se detectaron en los sitios 4 (0.19 mg/l) y 5 (0.15 mg/l), en nortes se observó en toda la laguna un valor de 0.01 mg/l; y para la época de lluvias las concentraciones más altas se detectaron en los sitios 2 (0.009 mg/l) y 3 (0.005 mg/l) (Fig. 21b).

Para este parámetro las fuentes principales parecen ser la entrada de agua subterránea combinada con filtraciones de aguas residuales.

Amonio.

El amonio presentó alta variabilidad temporal y baja variabilidad espacial. En toda la laguna las concentraciones fueron superiores al LMP establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática de agua dulce de 0.06 mg/l (línea roja, Fig. 22a). Los valores más altos se registraron en los sitios 2 (0.14 mg/l \pm 0.10), 3 (0.13 mg/l \pm 0.12) y 1 (0.12 mg/l \pm 0.16). Los tres sitios se localizan en el centro y sur de la laguna, frente a los poblados de Luis Echeverría y Raudales.

Como ocurrió en los dos indicadores anteriores, la mayor concentración de amonio se registró en abril (secas) con 0.23 mg/l \pm 0.06), pero le siguió el mes de agosto (lluvias) con 0.07 mg/l \pm 0.05 y el valor más bajo para este parámetro se observó en noviembre (lluvias) con 0.04 mg/l \pm 0.02. En Laguna Guerrero los principales aportes de amonio son las entradas de agua subterránea quizá mezcladas con aguas residuales de fosas sépticas de los poblados y la descomposición de materia orgánica de los sedimentos. Para lluvias y nortes parecen predominar los escurrimientos superficiales, la descomposición de materia orgánica y la resuspensión de sedimentos.

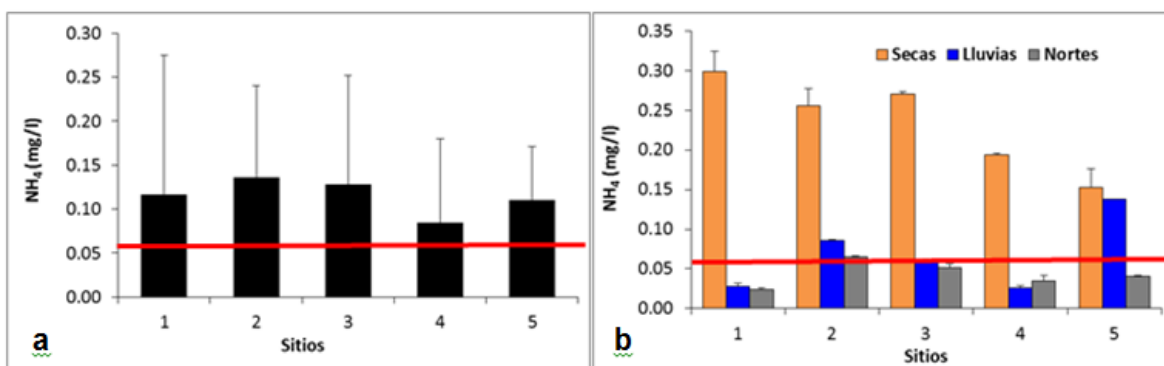


Fig.22.- Valores de amonio (NH₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua dulce.

Durante la época de secas se observa un gradiente de mayor a menor concentración de sur a norte de la laguna, con valores de 0.30 mg/l en el sitio 1 a 0.15 mg/l en el sitio 5, todos rebasaron el LMP de los CECAs. En lluvias los niveles por arriba del LMP se detectaron en los sitios 5 (0.14 mg/l) y 2 (0.09 mg/l), en tanto que para la temporada de nortes todos los valores fueron menores al LMP que es de 0.06 mg/l (línea roja, Fig. 22b).

Fosfatos. -

Los fosfatos presentaron alta variabilidad temporal y baja variabilidad espacial. La concentración promedio anual de los sitios 2 al 5 fue de 0.003 mg/l \pm 0.002 y para el sitio 1 fue de 0.004 mg/l \pm 0.003 (Fig. 23a).

La mayor concentración promedio por temporada climática se registró en secas (0.006 mg/l \pm 0.001) y para lluvias y nortes fue de 0.002 mg/l \pm 0.001. La fuente potencial de fosfatos para el mes de abril son las filtraciones de agua subterránea en combinación con lixiviados de fosas sépticas de los asentamientos humanos de Luis Echeverría y Raudales, mientras que para lluvias y nortes serían los escurrimientos superficiales.

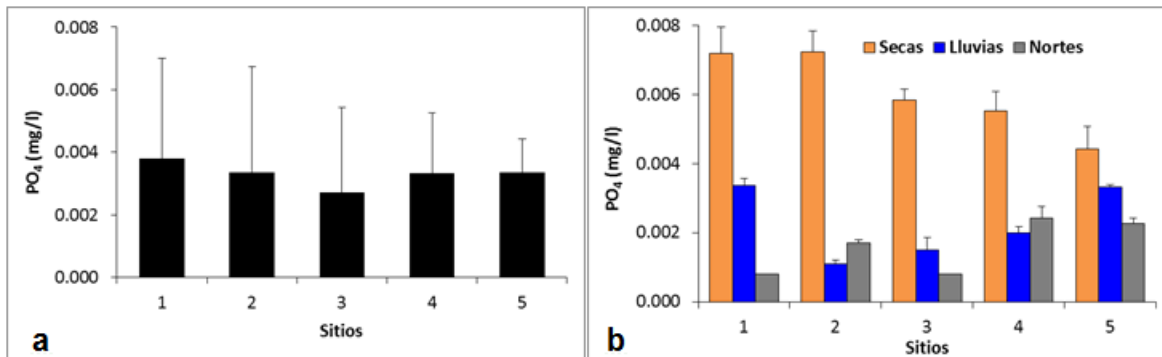


Fig.23.- Valores de fosfatos (PO₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017.

En secas se observó un gradiente de mayor a menor concentración de sur a norte de Laguna Guerrero, con valores de 0.007 mg/l en los sitios 1 y 2, y de 0.004 mg/l en el sitio 5. Para lluvias la concentración más alta (0.003 mg/l) se registró en los

sitios 1 y 5, mientras que en nortes en todo el sistema los valores fueron iguales o menores al límite de detección de 0.002 mg/l (Fig. 23b).

Durante el período de estudio, en la laguna no se rebasó el LMP de 0.1 mg/l establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática.

Silicatos.

Laguna Guerrero no presentó variabilidad espacial en la concentración de silicatos durante ninguna de las tres épocas climáticas. Por lo que la concentración promedio anual para los cinco sitios fue de 8.7 mg/l \pm 5.5 (Fig. 24a).

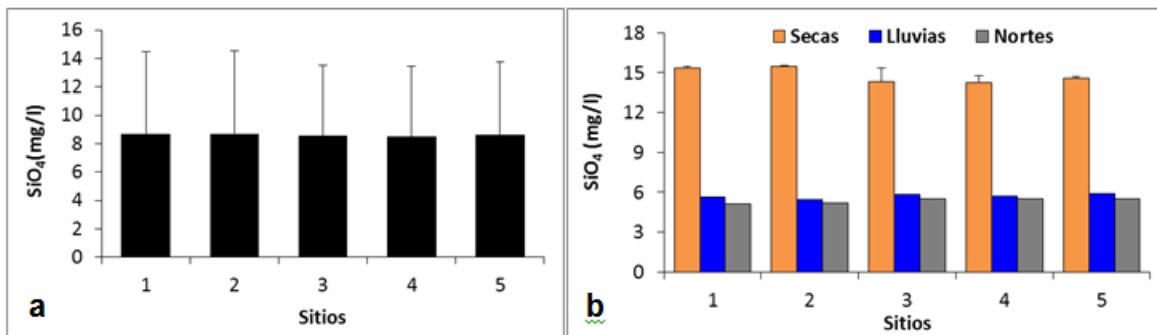


Fig.24.- Valores de silicatos (SiO₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017.

En la temporada de secas (abril) la concentración promedio fue de 14.8 mg/l \pm 0.6, en lluvias (agosto) fue de 5.7 mg/l \pm 0.2 y en nortes (agosto) fue de 5.4 mg/l \pm 0.2. El elevado valor de silicatos durante la época de secas confirma la fuerte influencia del agua subterránea en todo el sistema, mientras que la importante disminución de su concentración en las épocas de lluvias y nortes, indica la importancia de los escurrimientos superficiales debidos a la precipitación pluvial, en la calidad del agua de la laguna (Fig. 24b).

Clorofila a.

La variabilidad en la concentración de clorofila *a* en Laguna Guerrero se debió principalmente a las épocas climáticas. No obstante, los sitios 4 (2.3 μ g/l \pm 1.9) y 5

(2.1 $\mu\text{g/l} \pm 2.4$) registraron los valores promedio más alto, y el sitio 2 (1.3 $\mu\text{g/l} \pm 1.1$) el valor más bajo (Fig. 25a). La alta concentración de clorofilas en los sitios 4 y 5, parecen resultado de altas concentraciones de nitratos en estos sitios (Fig. 21a).

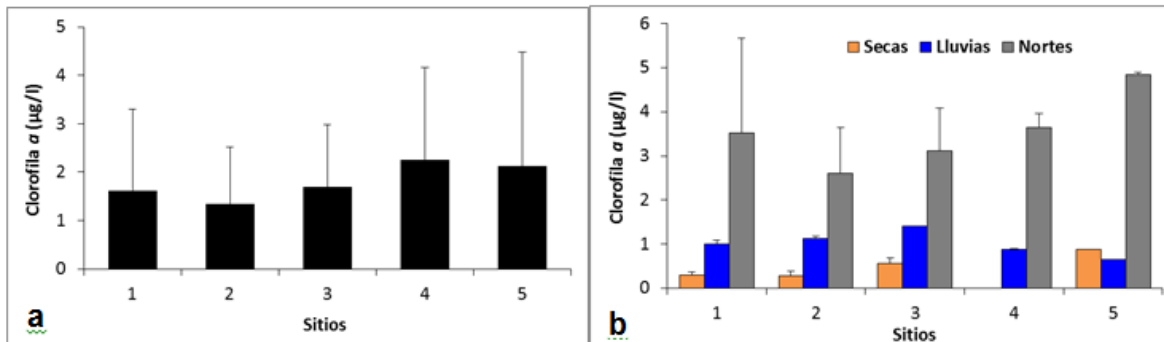


Fig.25.- Valores de clorofila a anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 5 sitios monitoreados en la Laguna Guerrero durante 2017.

La temporada de nortes (noviembre) registró la mayor concentración promedio de clorofila a (3.6 $\mu\text{g/l} \pm 0.8$), seguida de la época de lluvias (agosto) con 1 $\mu\text{g/l} \pm 0.3$, y secas (abril) fue la temporada de menor valor promedio con 0.5 $\mu\text{g/l} \pm 0.3$. Esta tendencia se mantuvo para todos los sitios, con excepción del sitio 5, en dónde la concentración en lluvias (0.7 $\mu\text{g/l}$) fue menor que en secas (0,9 $\mu\text{g/l}$) (fig. 25b).

4.2.3.- Laguna Chile Verde

4.2.3.1.-Fisicoquímicos:

Temperatura.-

Debido a que Laguna Chile Verde es un cuerpo de agua somero (baja profundidad) y de pequeñas dimensiones, la temperatura es espacialmente homogénea, sin embargo se registran ligeras variaciones no significativas, en dónde el valor promedio anual más bajo se registró en el sitio 1 28.9 $^{\circ}\text{C} \pm 2.7$ y el más alto en los sitios 2 y 3 con 29.4 $^{\circ}\text{C} \pm 3.0$ (Fig. 26a).

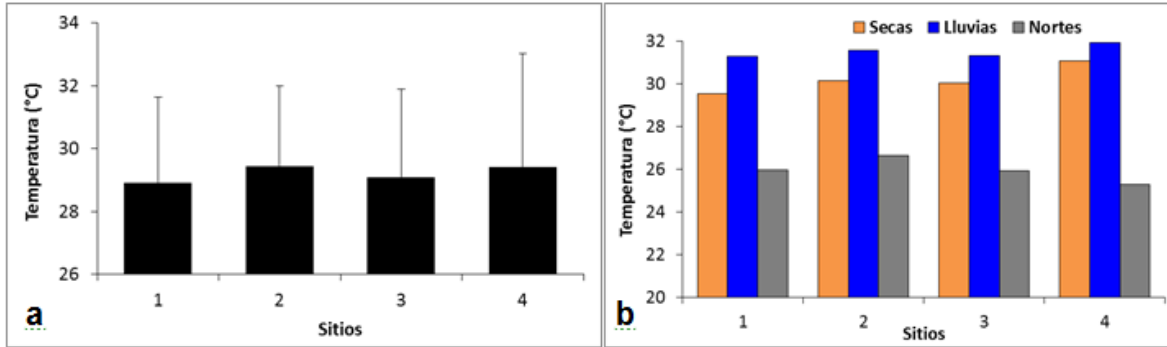


Fig. 26.- Valores de temperatura anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017.

En relación a la variabilidad temporal de la temperatura, la época de lluvias (agosto) registró el valor promedio más alto ($31.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.3$), seguido de la temporada de secas (abril) con $30.2 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.7$, siendo la época de nortes la de menor valor promedio con $26 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.5$. La temperatura más alta se registró en el sitio 4 durante las épocas de secas y lluvias ($31 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y $31.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$), y en el sitio 2 en la temporada de nortes ($26.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$) (Fig. 26b).

pH.

El valor de este parámetro fue también espacialmente homogéneo, con el valor promedio anual más bajo registrado en el sitio 1 (8.1 ± 0.2) y el más alto en los sitios 2 y 4 con un valor de 8.2 ± 0.2 (Fig. 27a).

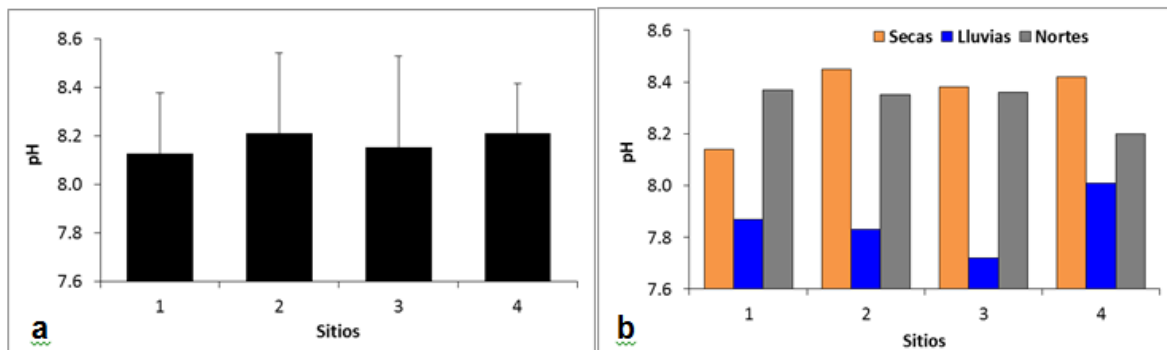


Fig. 27.- Valores de pH anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017.

Las temporadas de secas (abril) y nortes (noviembre) presentaron el mismo valor promedio de 8.3 ± 0.1 , en tanto que en la temporada de lluvias (agosto) se registró

el valor promedio más bajo (7.9 ± 0.1). El valor más bajo de pH en secas se presentó en el sitio 1 (8.1), en lluvias en el sitio 3 (7.7) y en nortes en el sitio 4 (8.2) (Fig. 27b). Se considera que valores de pH entre 6.0 y 8.5 son los normales en un cuerpo de agua natural (Chapman, 1996).

Oxígeno Disuelto.-

La concentración de oxígeno disuelto en la Laguna Chile Verde durante del período de monitoreo se mantuvo por arriba del límite mínimo de 5 mg/l establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática (línea roja Fig. 28 a y b). La concentración promedio anual más alta se registró en el sitio 3 ($9.9 \text{ mg/l} \pm 2.2$) y el más bajo en el sitio 4 con $7.9 \text{ mg/l} \pm 0.9$ (Fig. 28a).

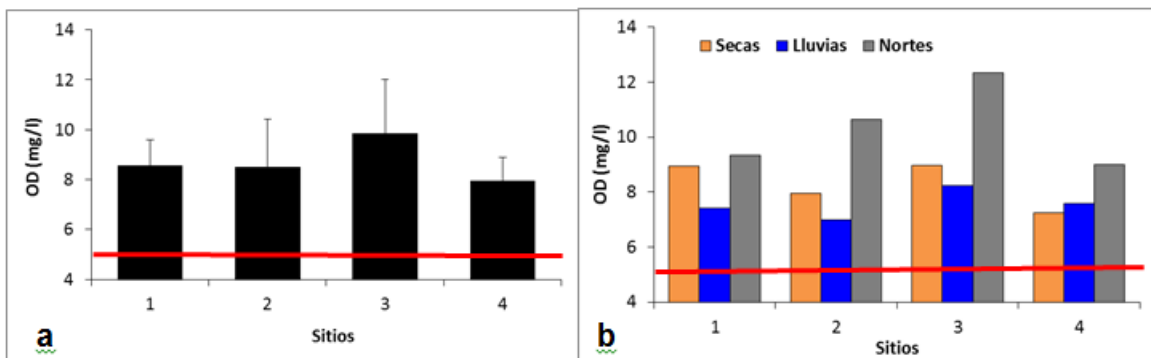


Fig.28.- Valores de oxígeno disuelto (OD) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática.

Durante el mes de noviembre (nortes) se registró la concentración promedio más alta de oxígeno disuelto ($10.3 \text{ mg/l} \pm 1.5$), seguido del mes de abril (secas) con $8.3 \text{ mg/l} \pm 0.8$, y el valor más bajo en el mes de agosto (lluvias) con $7.6 \text{ mg/l} \pm 0.5$. Destaca el sitio 3 en dónde se registró la concentración más alta durante las tres temporadas con valores de 9.0 mg/l (secas), 8.2 mg/l (lluvias) y 12.3 mg/l (nortes) (Fig. 28b).

Turbidez.

Como en los otros cuerpos de agua, la turbidez presenta una alta variabilidad espacial y temporal. El valor promedio anual más alto se registró en los sitios 1 (24.2 NTU \pm 10.6) y 4 (12.5 NTU \pm 7.5) localizados al sur y norte del sistema, respectivamente, en zonas someras que facilitan la resuspensión de sedimentos a la columna de agua; y los más bajos en los sitios 2 (10.4 NTU \pm 3.0) y 3 (7.8 NTU \pm 0.6), ubicados en el centro de la laguna (Fig. 29a).

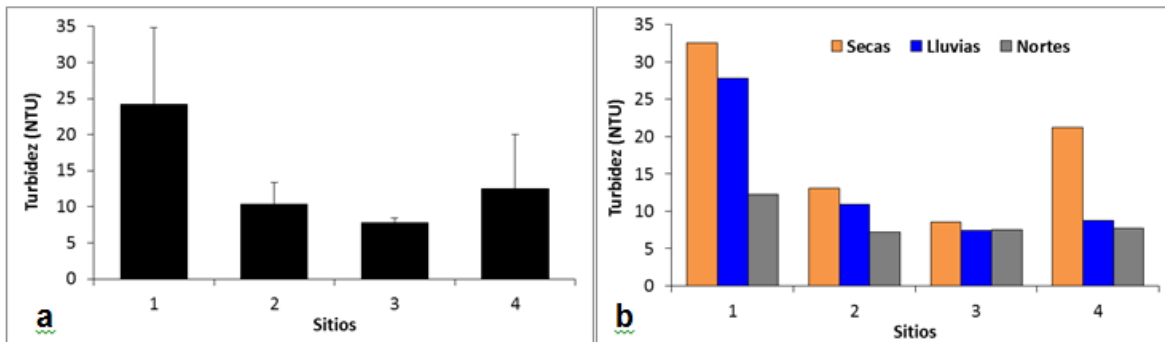


Fig. 29.- Valores de turbidez anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017.

Durante la temporada de secas (abril) se observó el valor promedio de turbidez más elevado (18.8 NTU \pm 10.5), seguido de la época de lluvias (13.7 NTU \pm 9.5) y en la temporada de nortes se registró el valor más bajo (8.7 NTU \pm 2.4). Destaca el sitio 1 dónde se registró la turbidez más alta en las tres temporadas de monitoreo, con 32.5 NTU en secas, 27.8 NTU en lluvias y 12.2 NTU en nortes (Fig. 29b).

Salinidad.

La salinidad fue espacialmente homogénea en todo el cuerpo de agua, con un valor promedio anual de 2.2 ‰ \pm 0.5 en los sitios 2, 3 y 4, y de 2.3 ‰ \pm 0.6 en el sitio 1 (Fig. 30a).

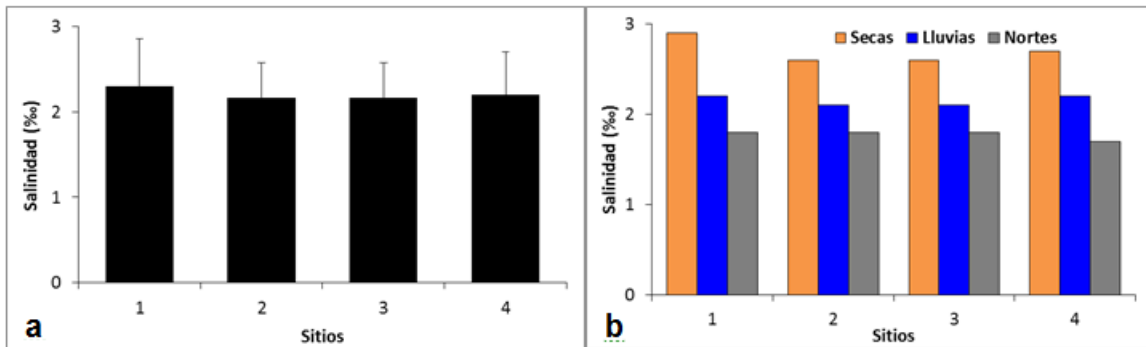


Fig. 30.- Valores de salinidad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017.

La temporada de secas (abril) registró el valor promedio de salinidad más alto (2.7 ‰ ± 0.1), seguida de la de lluvias (agosto) con un valor de 2.2 ‰ ± 0.1, y con el valor más bajo de 1.8 ‰ ± 0.1 en la época de nortes (noviembre). En el sitio 1 durante la época de secas (abril) se registró el valor más alto (2.9 ‰) de todo el período de monitoreo (Fig. 30b).

Conductividad.-

Al igual que la salinidad, la conductividad fue espacialmente homogénea en todo el sistema, con un valor promedio anual de 4.1 mS/cm ± 0.8 en los sitios 2, 3 y 4, y de 4.3 mS/cm ± 1.0 en el sitio 1 (Fig. 31a).

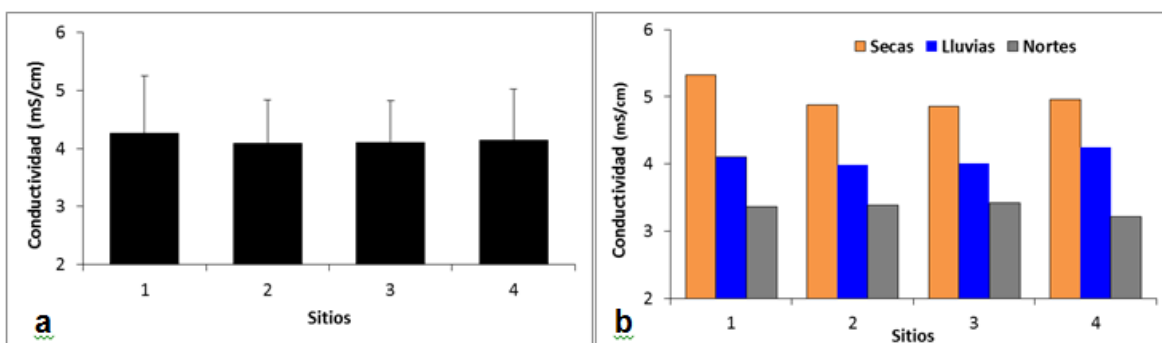


Fig. 31.- Valores de conductividad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017.

Temporalmente, el valor promedio más alto se registró en el mes de abril (secas) con 5.0 mS/cm ± 0.2, seguido del mes de agosto (lluvias) con 4.1 mS/cm ± 0.1 y del mes de noviembre (nortes) con el valor más bajo de 3.4 mS/cm ± 0.1. En el

sitio 1 se registró el valor más alto de conductividad (5.3 mS/cm) durante todo el período de monitoreo (Fig. 31b).

4.2.3.2.-Nutrientes:

Para cuerpos de agua dulce solo se establecen criterios ecológicos de calidad del agua (CECAs) para amonio y fosfatos.

Nitritos.-

La concentración promedio anual de nitritos en Laguna Chile Verde indica que la variabilidad en el sistema se debió principalmente a las épocas climáticas. Así, en el sitio 1 se registró el valor más alto (0.0014 mg/l \pm 0.0015), seguido de los sitios 2 y 4 (0.0010 mg/l \pm 0.0011) y el valor más bajo en el sitio 3 de 0.0009 mg/l \pm 0.0014 (Fig. 32a). El sitio 1 se localiza en el sur del sistema que es la más somera y por lo tanto con mayor mezcla de la materia orgánica del sedimento con la columna de agua, que podría explicar la mayor concentración observada.

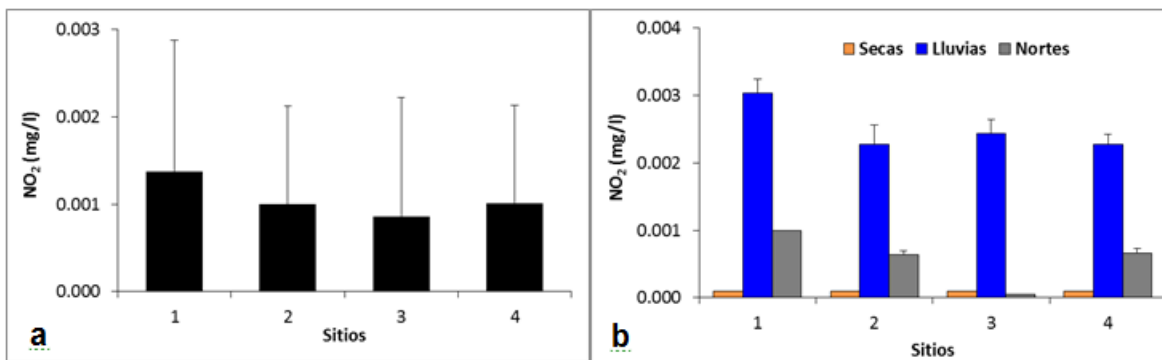


Fig.32.- Valores de nitritos (NO₂) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017.

Para este sistema, la concentración promedio más alta se registró en la temporada de lluvias (agosto) de 0.003 mg/l \pm 0.0004, seguido del mes de noviembre (nortes) con 0.001 mg/l \pm 0.0004. Para la época de secas (abril), los nitritos fueron menores al límite de detección del método que es de 0.0001 mg/l en todo el sistema. En el sitio 1 se registraron las concentraciones más altas de todo el sistema, en la temporada de lluvias (0.003 mg/l) y nortes (0.001 mg/l) (Fig. 32b).

Nitratos.

Para este parámetro se observó alta variabilidad espacial y estacional en Laguna Chile Verde. La concentración promedio anual más alta se registró en el sitio 1 $0.009 \text{ mg/l} \pm 0.002$ y la más baja en el sitio 2 y 4 con $0.004 \text{ mg/l} \pm 0.003$ (Fig. 33a).

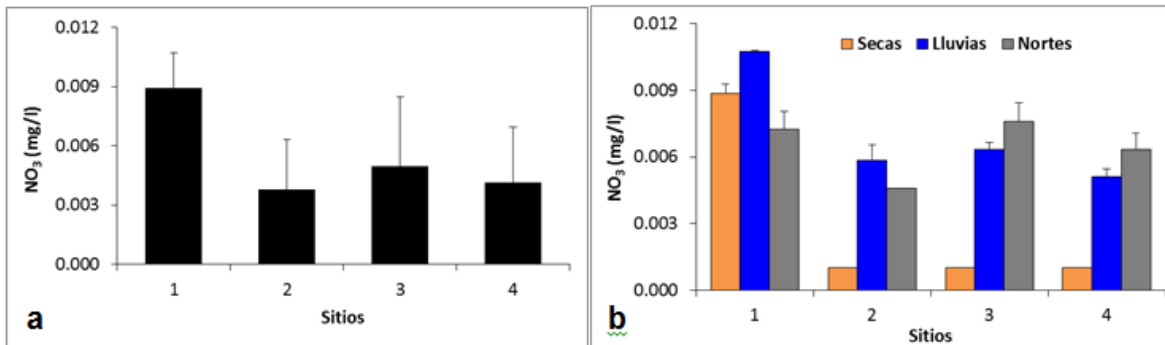


Fig.33.- Valores de nitratos (NO_3) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017.

La concentración promedio más alta por época climática se registró en lluvias (agosto) con $0.007 \text{ mg/l} \pm 0.003$, seguido de la de nortes (noviembre) $0.006 \text{ mg/l} \pm 0.001$, y durante secas los sitios 2 a 4 registraron valores inferiores al límite de detección (0.002 mg/l), sin embargo el sitio 1 presentó uno de los valores más altos con 0.009 mg/l . El mismo sitio 1 registró en la temporada de lluvias el valor más alto de todo el período de monitoreo (0.011 mg/l). En tanto que para nortes el valor más alto se obtuvo en el sitio 3 con 0.008 mg/l (Fig. 33b). En base a estos resultados y las características del sistema, las fuentes principales de nitratos son los escurrimientos superficiales y la resuspensión de sedimentos ricos en materia orgánica, durante las épocas de lluvias y nortes, así como la entrada de agua subterránea principalmente en el sitio 1 (Fig. 36b).

Amonio.

La concentración promedio anual más alta de amonio se registró en el sitio 1 ($0.08 \text{ mg/l} \pm 0.03$), cuyo valor es superior al LMP de 0.06 mg/l establecido por los CECAs para para la protección de la vida acuática (línea roja, Fig. 34a), seguido

del sitio 2 ($0.05 \text{ mg/l} \pm 0.02$), y los sitios 3 y 4 que presentaron el valor más bajo de $0.04 \text{ mg/l} \pm 0.02$ (Fig. 34a).

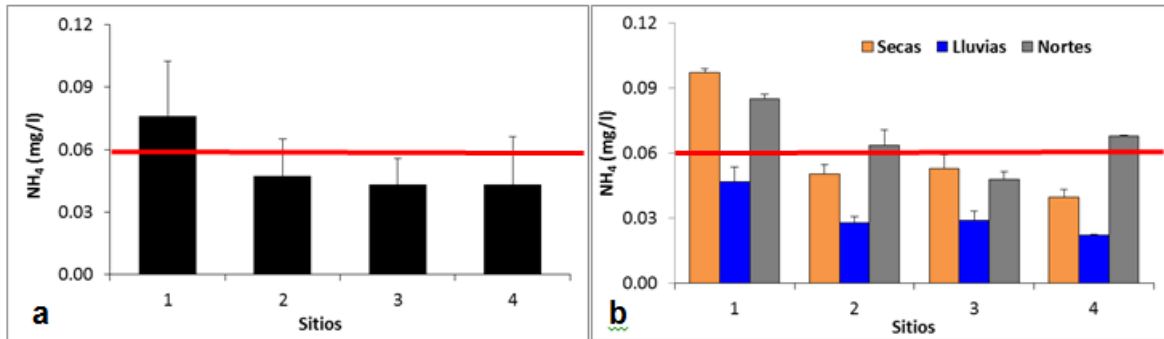


Fig.34.- Valores de amonio (NH_4) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua dulce.

En relación con el comportamiento temporal del amonio en Laguna Chile Verde, la concentración promedio mayor se registró en el mes de noviembre (nortes) con $0.07 \text{ mg/l} \pm 0.02$, que es superior al LMP de los CECAs de 0.06 mg/l . En el mes de abril (secas) se registró el segundo promedio más alto ($0.06 \text{ mg/l} \pm 0.03$), seguido del mes de agosto (lluvias) con $0.03 \text{ mg/l} \pm 0.01$. Durante la temporada de nortes los sitios 1 (0.09 mg/l), 2 (0.064 mg/l) y 4 (0.068 mg/l), así como el sitio 1 (0.10 mg/l) durante la época de secas, registraron concentraciones superiores al LMP establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática (línea roja, Fig. 34b). Nuevamente, las fuentes principales de amonio al sistema son los escurrimientos superficiales y la resuspensión de sedimentos ricos en materia orgánica, principalmente durante la época de nortes, así como la entrada de agua subterránea principalmente en el sitio 1 (Fig. 36b).

Fosfatos. -

En el caso de los fosfatos el comportamiento espacial y temporal fue diferente al observado para las formas de nitrógeno. Así, la mayor concentración promedio anual se registró en el sitio 4 ($0.004 \text{ mg/l} \pm 0.004$), localizado al norte de Laguna Chile Verde en una zona somera en dónde fácilmente puede ocurrir la resuspensión de sedimentos con alto contenido de materia orgánica, que es una fuente de nutrientes. Los sitios 1 y 2 presentaron la misma concentración

promedio anual de 0.003 mg/l \pm 0.002, seguido del sitio 3 con 0.002 mg/l \pm 0.002 (Fig. 35a).

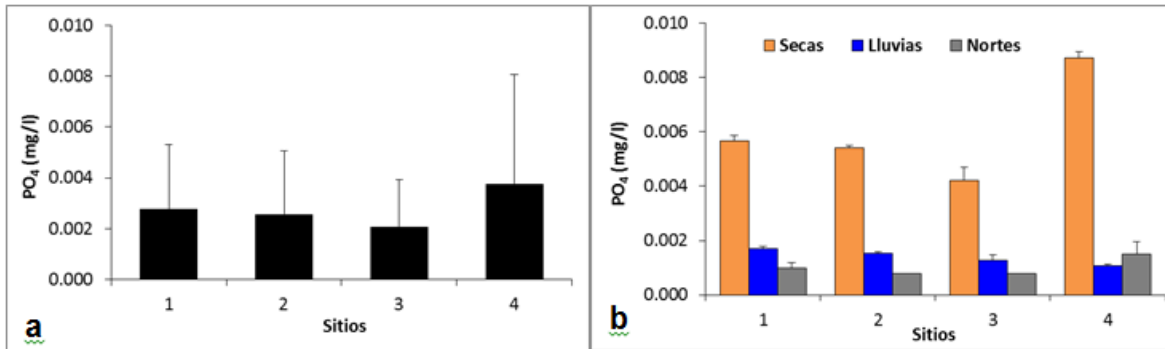


Fig.35.- Valores de amonio (PO₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017.

La temporada de secas (abril) registró las concentraciones más altas de fosfatos, en donde el sitio 4 presentó el valor más alto (0.009 mg/l) y el sitio 3 el más bajo (0.004 mg/l). En tanto que en las otras dos temporadas la mayoría de los sitios registraron valores menores al límite de detección de 0.001 mg/l. En lluvias (agosto) los sitios 1 y 2 registraron valores de 0.002 mg/l \pm 0.0001, y el sitio 4 durante la época de nortes (noviembre) con 0.002 mg/l (Fig. 35b).

En todo el sistema, las concentraciones de fosfatos fueron inferiores al LMP de 0.1 mg/l establecidos por los CECAs para la protección de la vida acuática de agua dulce.

Silicatos.-

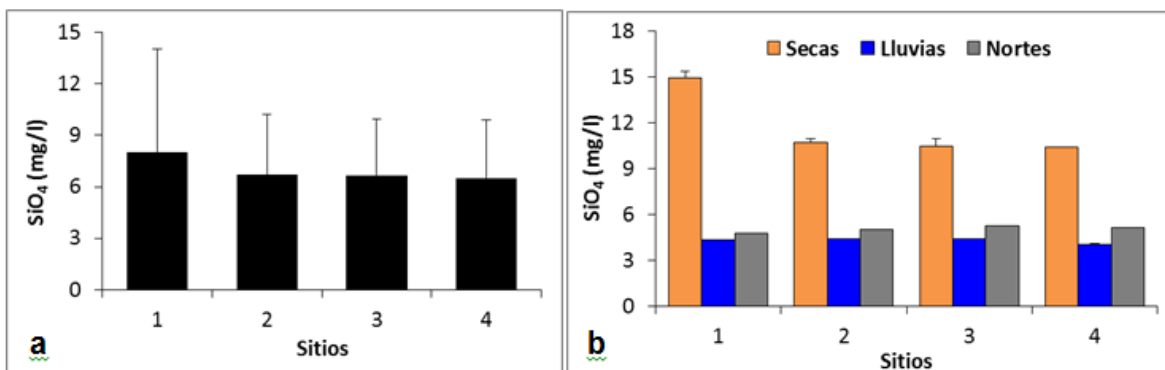


Fig.36.- Valores de silicatos (SiO₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017.

Para éste parámetro la variabilidad espacial se observó solo durante la temporada de secas, que se refleja en la concentración promedio anual con el valor más alto en el sitio 1 (8.0 mg/l \pm 6), mientras que en los sitios 2, 3 y 4 se registra el mismo valor de 6.7 mg/l \pm 3.3 (Fig. 36a).

En la época de secas (abril) se presentó la concentración promedio más alta (11.6 mg/l \pm 2.2), seguida de la temporada de nortes (noviembre) con 5.0 mg/l \pm 0.2 y la más baja durante la época de lluvias (agosto) con 4.3 mg/l \pm 0.2. La concentración más alta se registró en el sitio 1 (15 mg/l) durante la época de secas y la más baja en el sitio 4 (4 mg/l) en la temporada de lluvias (Fig. 36b).

Clorofila a.-

Las concentraciones promedio anual más altas de clorofila a se registraron en los sitios 2 (1.5 μ g/l \pm 0.9) y 4 (1.4 μ g/l \pm 0.9) que tuvieron alta variabilidad temporal, en tanto que los sitios 1 (1.0 μ g/l \pm 0.1) y 3 (1.2 μ g/l \pm 0.01) presentaron las más bajas sin variabilidad temporal (Fig. 37 a y b).

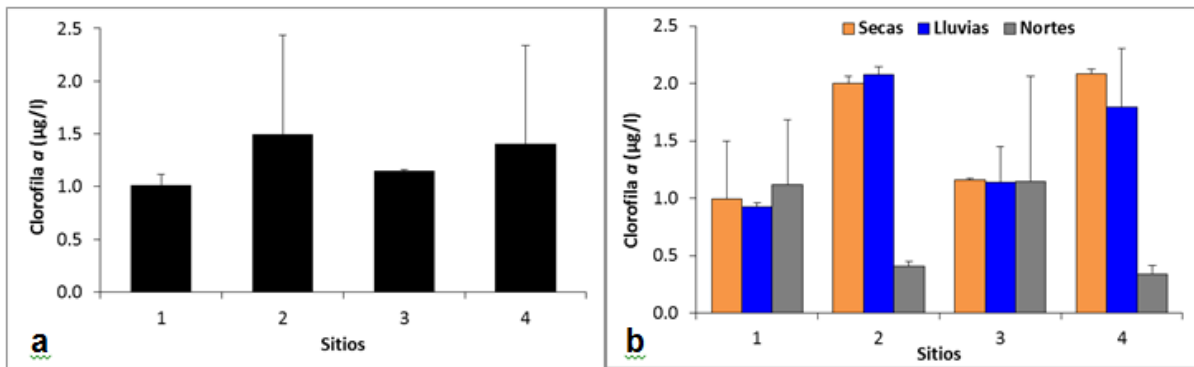


Fig.37.- Valores de clorofila a anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 4 sitios monitoreados en la Laguna Chile Verde durante 2017.

En relación con la variabilidad temporal, la concentración promedio menor se registró durante la época de nortes (0.8 μ g/l \pm 0.4) y las más altas en secas (1.6 μ g/l \pm 0.6) y lluvias (1.5 μ g/l \pm 0.5). Las concentraciones más altas en secas (abril) y lluvias (agosto) se presentaron en los sitios 2 (2.0 μ g/l, 2.1 μ g/l) y 4 (2.1 μ g/l, 1.8 μ g/l), respectivamente. Los mismos sitios 2 y 4 también registraron las concentraciones más bajas durante la temporada de nortes (0.4 μ g/l y 0.3 μ g/l,

respectivamente) (Fig. 37b). Las concentraciones altas de clorofila a parecen estar asociadas a la concentración de fosfatos, silicatos y nitratos en estos sitios durante estas dos temporadas.

4.2.4. - Laguna Agua Salada

4.2.4.1. - Fisicoquímicos:

Temperatura.-

Debido a que Laguna Salada tiene una superficie pequeña y de poca profundidad, no se observó variabilidad espacial, solamente a nivel temporal. Así, la concentración promedio anual para el sitio 1 fue de $30.7^{\circ}\text{C} \pm 3$ y los sitios 2 y 3 presentaron el mismo valor de $29.9^{\circ}\text{C} \pm 2.7$ (Fig. 38a).

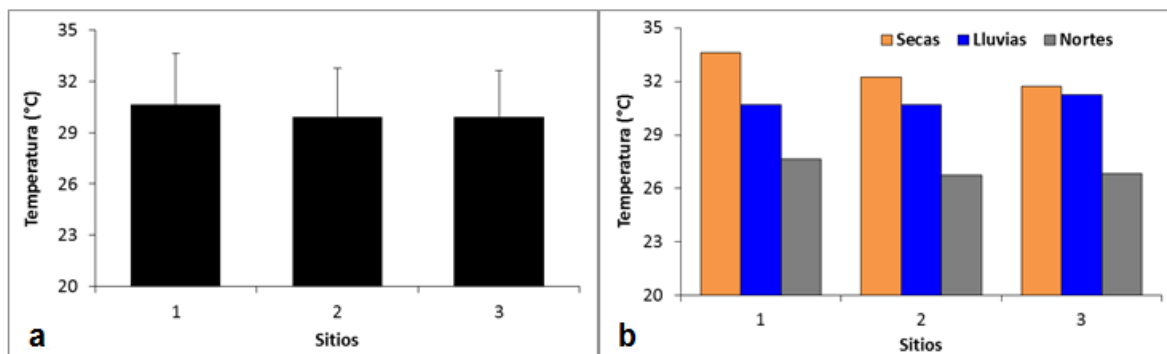


Fig.38.- Valores de temperatura anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2017.

La época de secas (abril) registró el valor promedio mayor ($32.5^{\circ}\text{C} \pm 1$), seguido de la temporada de lluvias (agosto) con $30.9^{\circ}\text{C} \pm 0.3$ y la menor temperatura durante la época de nortes (agosto) con $27.1^{\circ}\text{C} \pm 0.5$. El sitio 1 presentó la temperatura más alta en las temporadas de secas y nortes con valores de 33.6°C y 27.7 , respectivamente, y el sitio 3 en la temporada de lluvias con 31.2°C (Fig. 38b).

pH. -

El pH presentó variabilidad espacial solamente durante la temporada de secas, debido al sitio 2 que registró el valor promedio anual más alto (8.2 ± 0.6). Los sitios 1 y 2 presentaron similares valores promedio de 7.4 ± 0.9 y 7.3 ± 1.2 , respectivamente (Fig. 39a).

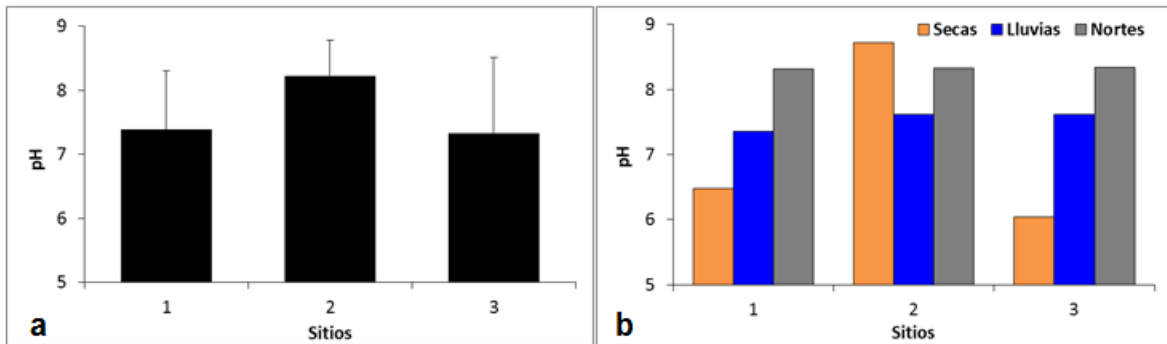


Fig.39.- Valores de pH anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2017.

Se observó una importante variabilidad temporal en el valor de pH, con la época de nortes (noviembre) registrando el valor promedio más alto (8.3 ± 0.0), seguido de la de lluvias (agosto) con 7.5 ± 0.2 , y la temporada de secas (abril) con el valor más bajo (7.1 ± 1.2). Como se indicó más arriba, solo se observó variabilidad espacial durante la temporada de secas, en dónde el valor más alto se registró en el sitio 2 (8.7), seguido de los sitios 1 y 3 con valores de 6.5 y 6.0, respectivamente (fig. 39b).

Oxígeno Disuelto. -

De acuerdo a los CECAs que establecen que el valor mínimo de oxígeno disuelto (OD) para la protección de la vida acuática debe ser de 5 mg/l, se puede observar en las figuras 40 a y b (línea roja) que Laguna Salada presentó una adecuada concentración de este parámetro y baja variabilidad espacial. Con valores promedio anual de $8.7 \text{ mg/l} \pm 0.9$ para el sitio 2, $8.3 \text{ mg/l} \pm 1.0$ para el sitio 3 y de $7.4 \text{ mg/l} \pm 3.0$ para el sitio 1.

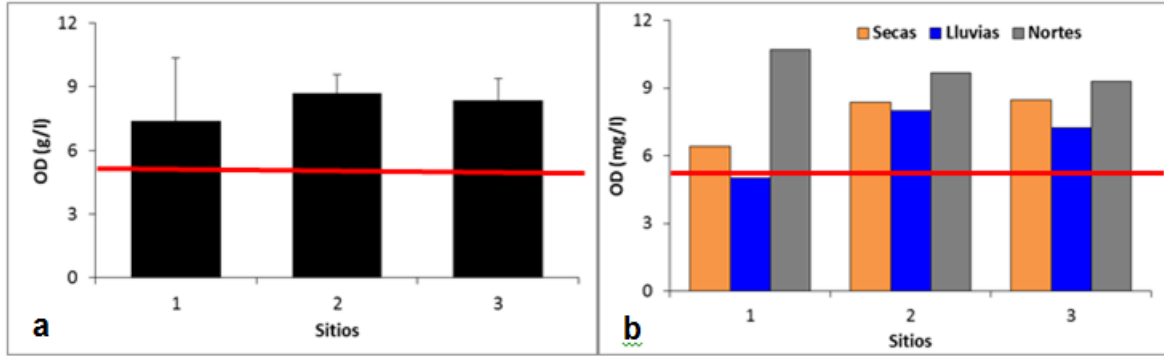


Fig.40.- Valores de oxígeno disuelto (OD) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2017. La línea roja representa el LMP establecido en los CECA para protección de vida acuática.

Como se esperaría para un cuerpo de agua somero con fuerte influencia del viento para saturar de oxígeno disuelto la columna de agua, durante la temporada de nortes (noviembre) se registró la concentración promedio más alta de 9.9 mg/l \pm 0.7. El mes de abril (secas) registró un valor promedio de 7.8 mg/l \pm 1.2, mientras que en agosto (lluvias) fue de 6.8 mg/l \pm 1.6. En cada época climática la concentración más alta se registró en sitios diferentes, así en nortes fue el sitio 1 (10.7 mg/l), en secas el sitio 3 (8.5 mg/l) y en lluvias el sitio 2 (8.0 mg/l) (Fig. 40b).

Turbidez.-

Al igual que en los otros cuerpos de agua, la turbidez mostró una alta variabilidad espacial y temporal en Laguna Salada; que registró un gradiente de sur a norte del sistema, en dónde el sitio 1 presentó el valor promedio anual más alto de 6.1 NTU \pm 6.2, seguido de los sitios 2 y 3 con valores de 2.7 NTU \pm 1.8 y 2.0 NTU \pm 1.9, respectivamente (Fig. 41a).

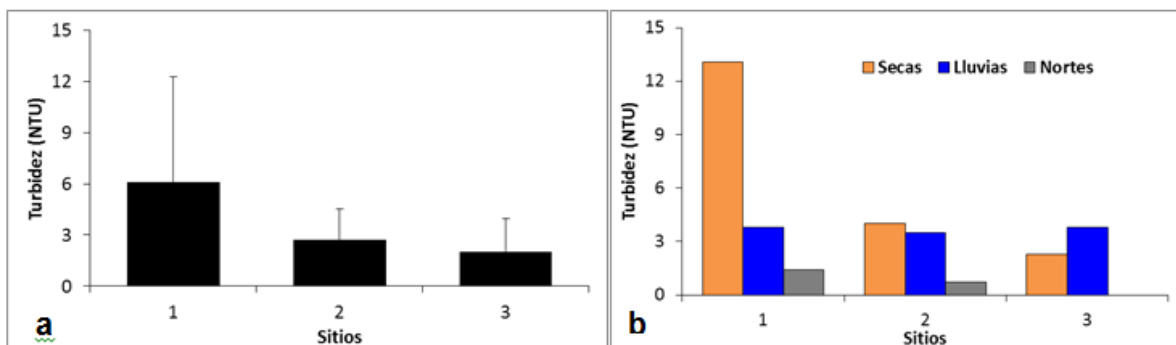


Fig.41.- Valores de turbidez anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2017.

Durante la temporada de secas se reportó la concentración promedio más alta (6.5 NTU \pm 5.8), seguida de la de lluvias (3.7 NTU \pm 0.2) y de nortes (0.7 NTU \pm 0.7), destacando el sitio 1 en la época de secas en dónde se registró el valor más alto de 13.1 NTU (Fig. 41b). No obstante, es importante destacar que estos valores de turbidez son muy bajos.

Salinidad.-

La salinidad fue espacialmente homogénea en todo el cuerpo de agua, con alguna variabilidad temporal. Así, el valor promedio anual fue de 11.8 ‰ \pm 0.8 en el sitio 3, de 11.6 ‰ \pm 2.3 para el sitio 1, y de 11.5 ‰ \pm 1.0 en el sitio 2 (Fig. 42a).

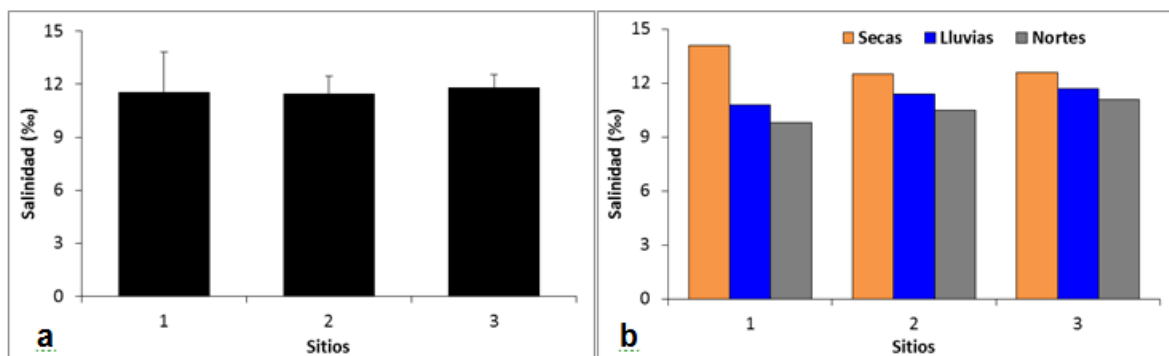


Fig.42.- Valores de salinidad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2017.

En la época de secas (abril) se reportó el valor promedio más alto (13.1 ‰ \pm 0.9), seguido de la temporada de lluvias (agosto) con 11.3 ‰ \pm 0.5 y la época de nortes (noviembre) con el valor más bajo de 10.5 ‰ \pm 0.7. En la temporada de secas el sitio 1 presentó el valor mayor (14.1 ‰), mientras que para lluvias y nortes el valor más alto se observó en el sitio 3 (11.7 ‰ y 10.5 ‰, respectivamente) (Fig. 42b).

Conductividad.-

Como se describió para los otros cuerpos de agua, la conductividad en Laguna Salada presentó el mismo patrón espacial y temporal que la salinidad. Con

concentraciones promedio anual similares en los sitios 1 ($19.5 \text{ mS/cm} \pm 3.6$), 2 ($19.3 \text{ mS/cm} \pm 1.6$) y 3 ($19.8 \text{ mS/cm} \pm 1.2$) (Fig. 43a).

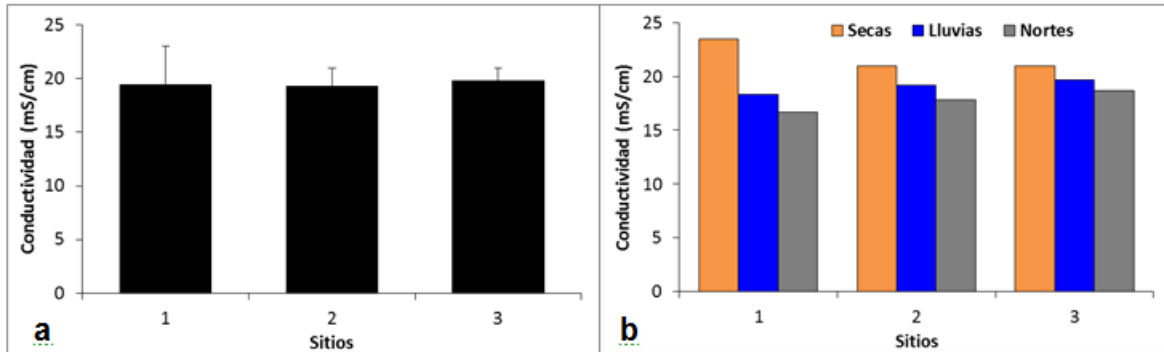


Fig.43.- Valores de conductividad anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2017.

La temporada de secas presentó el valor de conductividad más alto ($21.8 \text{ mS/cm} \pm 1.4$), seguido de la época de lluvias y de nortes con valores de $19.1 \text{ mS/cm} \pm 0.7$ y $17.7 \text{ mS/cm} \pm 1.0$, respectivamente. El sitio 1 registró el valor más alto en secas (23.5 mS/cm) y el sitio 3 en lluvias y nortes con valores de 19.7 mS/cm y 18.7 mS/cm , respectivamente (Fig. 43b).

4.2.4.2.-Nutrientes:

Debido a que esta laguna presenta características de un cuerpo de agua salobre, se utilizaron los mismos valores de los CECAs con que se analizó a la bahía de Chetumal.

Nitritos.-

Para este nutriente la variabilidad estuvo asociada principalmente a las épocas climáticas, debido a que los sitios 1, 2 y 3 presentaron similar concentración promedio anual, con valores de $0.0012 \text{ mg/l} \pm 0.0012$, $0.0013 \text{ mg/l} \pm 0.0013$ y $0.0015 \text{ mg/l} \pm 0.0014$, respectivamente (Fig. 44a).

Durante la temporada de lluvias se registró la concentración promedio más alta ($0.0026 \text{ mg/l} \pm 0.0002$), que es superior al LMP de 0.002 mg/l establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática.

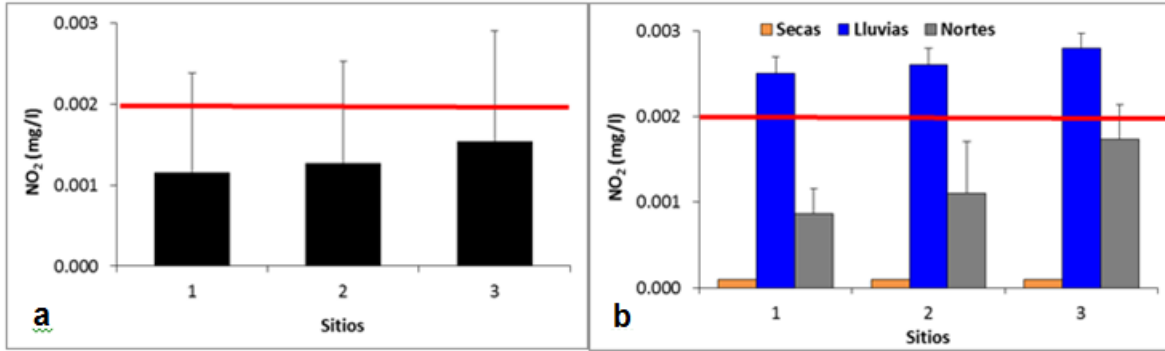


Fig.44.- Valores de nitritos (NO₂) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2017. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

En la temporada de nortes el valor promedio fue de 0.0012 mg/l ± 0.0004 y durante la época de secas las concentraciones en los tres sitios estuvieron por debajo del límite de detección del método (0.0001 mg/l). Tanto en lluvias como en nortes el sitio 3 registró la concentración más alta de 0.0028 mg/l y 0.0017 mg/l, respectivamente (Fig. 44b).

Nitratos.-

Para este indicador de calidad del agua se observó baja variabilidad estacional, debido a las bajas concentraciones registradas durante el período de monitoreo. Espacialmente se presentó un gradiente de sur a norte, en donde el sitio 1 registró el valor promedio anual mayor (0.0044 mg/l ± 0.005), seguido del sitio 2 (0.0015 mg/l ± 0.0008) y del sitio 3 con 0.0010 mg/l ± 0.000 (Fig. 45a).

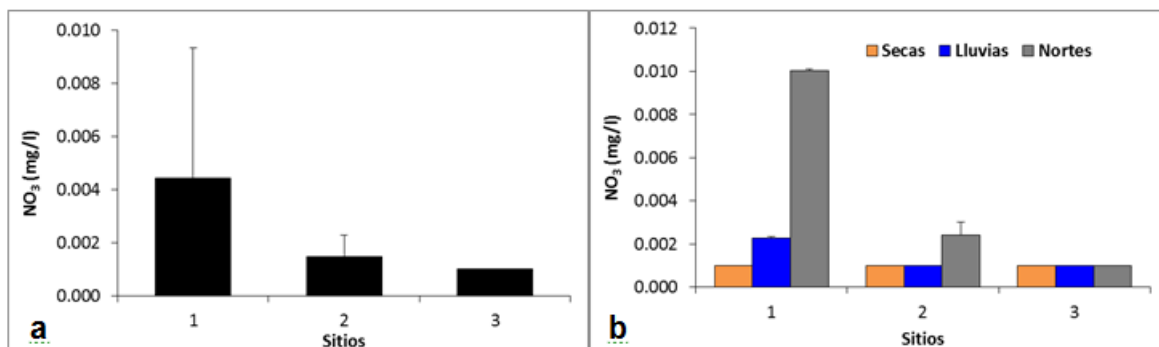


Fig.45.- Valores de nitratos (NO₃) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2017.

Durante las tres épocas climáticas la concentración de nitratos estuvo por debajo o en el límite de detección del método de 0.002 mg/l. Sólo en el sitio 1 se registró un valor superior (0.010 mg/l) durante la época de nortes (Fig. 45b). Por lo que Laguna Salada presentó valores menores al LMP para la protección de la vida acuática establecido por los CECAs de 0.04 mg/l (valor que esta fuera de la escala de las figuras 45 a y b, razón por la cual no se graficó la línea roja correspondiente).

Amonio. -

Al contrario de lo observado con los indicadores anteriores, las concentraciones de amonio en Laguna Salada, fueron superiores espacial y temporalmente al LMP de 0.01 mg/l establecido por los CECAs para la protección de la vida acuática de agua salobre (línea roja, Figs. 46 a y b). El sitio 1 presentó una concentración promedio anual de 0.076 mg/l \pm 0.06, el sitio 3 un valor de 0.075 mg/l \pm 0.019 y de 0.065 mg/l \pm 0.012 en el sitio 2 (Fig. 46a).

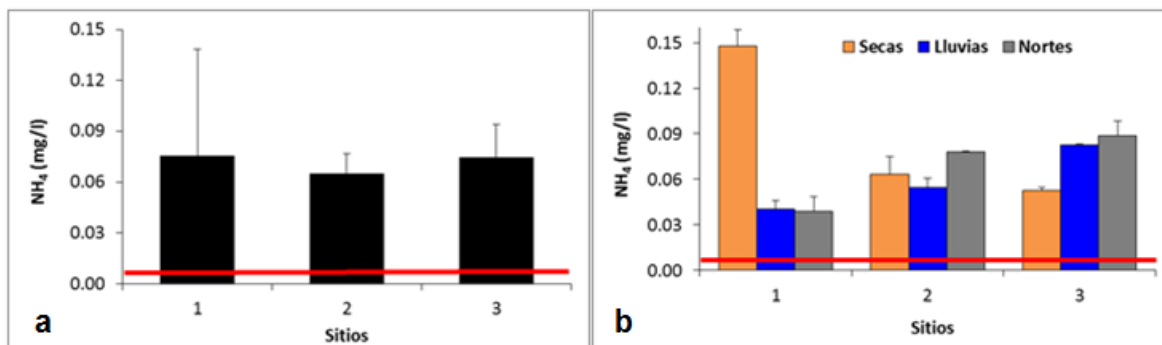


Fig.46.- Valores de amonio (NH₄) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2017. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

Durante la época de secas (abril) se registró la concentración promedio mayor (0.09 mg/l \pm 0.05), seguida de la temporada de nortes (noviembre) con 0.07 mg/l \pm 0.03 y de 0.06 mg/l \pm 0.02 en la temporada de lluvias (agosto). Destaca el sitio 1 durante la época de secas con una elevada concentración de 0.148 mg/l (fig. 46b).

Fosfatos. -

Espacialmente se observó un gradiente de sur a norte en la concentración promedio anual de fosfatos, con un valor de 0.0043 mg/l \pm 0.0050 en el sitio 1, de 0.0037 mg/l \pm 0.0043 en el sitio 2 y de 0.0029 mg/l \pm 0.0027; en los tres sitios su valor fue superior al LMP de 0.002 mg/l establecido por los CECAs para la protección de vida acuática (línea roja, Fig. 47a).

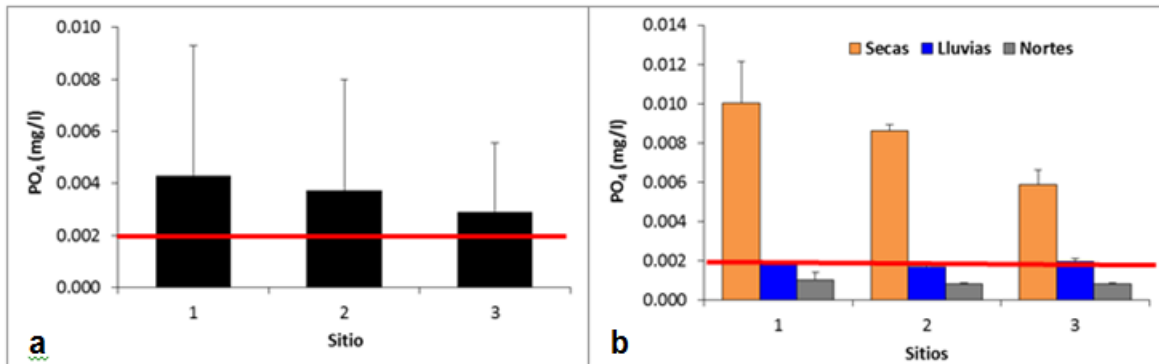


Fig.47.- Valores de fosfatos (PO_4) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2017. La línea roja representa el LMP establecido en los CECAs para protección de vida acuática de agua salobre o marina.

Durante la temporada de secas (abril) se registró el valor promedio mayor con 0.008 mg/l \pm 0.002, seguido de la época de lluvias (agosto) con 0.002 mg/l \pm 0.0001 y de la temporada de nortes (noviembre) con 0.001 mg/l \pm 0.0001. Solamente durante la época de secas los tres sitios de Laguna Salada presentaron concentraciones superiores al LMP de los CECAs (Fig. 47b). Es probable que la entrada de agua subterránea y la descomposición de materia orgánica de los sedimentos que fácilmente pueden alcanzar la columna de agua por su propia profundidad, sean el origen de estas elevadas concentraciones.

Silicatos. -

No se observó variabilidad espacial en la concentración promedio anual de silicatos en Laguna Salada, ya que el valor más alto fue de 5.5 mg/l \pm 3.6 en el sitio 1 y el más bajo (5.0 mg/l \pm 2.1) en el sitio 2 (Fig. 48a).

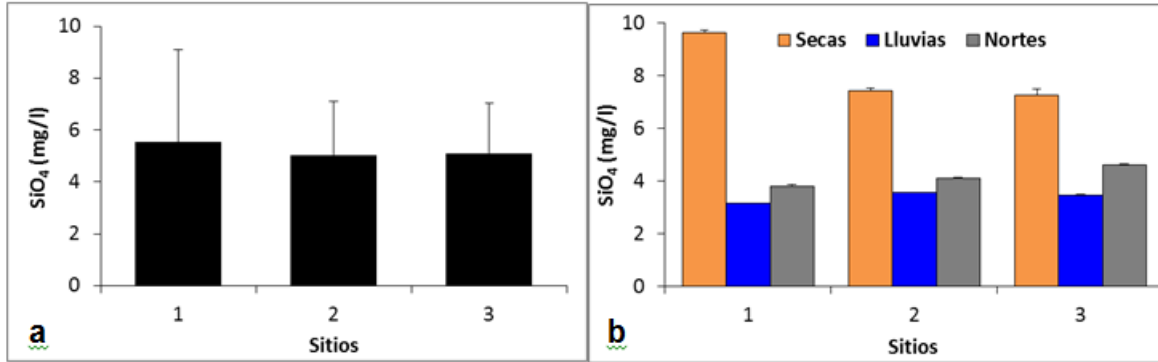


Fig.48.- Valores de silicatos (SiO_4) anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2017.

Durante la temporada de secas (abril) se registró la concentración promedio mayor de silicatos ($8.1 \text{ mg/l} \pm 1.3$), seguida de la época de nortes y lluvias con valores de $4.2 \text{ mg/l} \pm 0.4$ y de $3.4 \text{ mg/l} \pm 0.2$, respectivamente. Esto indica que en secas la principal o única entrada de agua dulce al sistema es el agua subterránea, mientras que en lluvias y nortes se suma la precipitación pluvial como otra entrada de agua dulce al sistema. En el sitio 1 se registró la concentración más alta durante la época de secas (9.6 mg/l), en el sitio 2 para lluvias (3.6 mg/l) y en el sitio 3 para nortes con 4.6 mg/l (Fig. 48b).

Clorofila a.-

Para este indicador de calidad del agua se observó gran variabilidad espacial y temporal. Así, la concentración promedio anual mayor se registró en el sitio 2 con $2.2 \mu\text{g/l} \pm 1.0$, seguido del sitio 1 con $2.0 \mu\text{g/l} \pm 1.4$ y del sitio 3 con $1.9 \mu\text{g/l} \pm 1.5$ (Fig. 49a).

Durante el mes de agosto (lluvias) se registró la concentración promedio mayor de clorofila a ($3.0 \mu\text{g/l} \pm 0.6$), seguida del mes de noviembre (nortes) con $2.0 \mu\text{g/l} \pm 1.3$ y del mes de abril (secas) con $1.1 \mu\text{g/l} \pm 0.8$. En las temporadas de secas y lluvias, el sitio 1 presentó las concentraciones mayores en la laguna ($1.8 \mu\text{g/l}$ y $3.4 \mu\text{g/l}$, respectivamente), mientras que en nortes se registró en el sitio 2 con $3.2 \mu\text{g/l}$ (Fig. 49b).

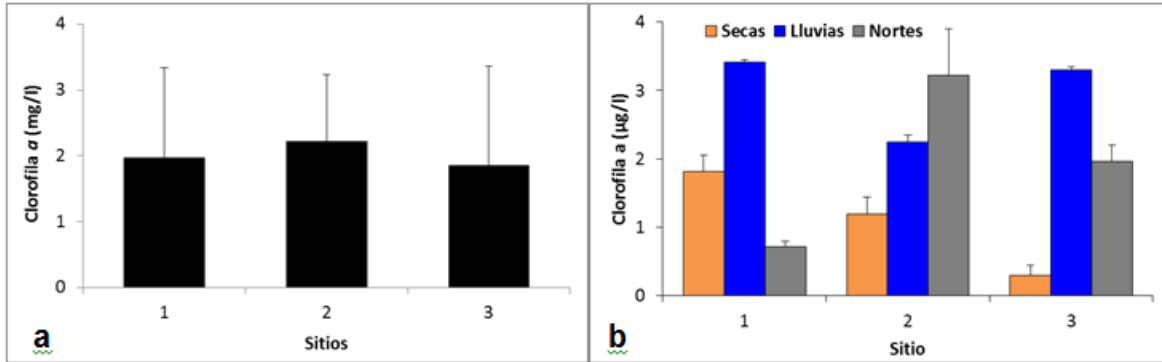


Fig.49.- Valores de clorofila a anual promedio (a) y por época climática (b) en la columna de agua de los 3 sitios monitoreados en la Laguna Agua Salada durante 2017.

Las concentraciones altas de clorofila a en las temporadas de lluvias y nortes, parecen estar asociadas a los niveles de nitritos y nitratos registrados en estos mismos períodos de monitoreo.

4.3.- Evaluación de la condición y estado trófico.

En esta sección se analizan dos indicadores que integran el comportamiento espacial y temporal de los nutrientes, que determinan la condición de cada uno de los cuatro cuerpos de agua en base a su enriquecimiento orgánico.

4.-3.1.- Bahía de Chetumal

Índice Trófico.-

En la tabla 5, se presentan los índices tróficos obtenidos para nutriente y por temporada climática, en cada uno de los 18 sitios monitoreados. En relación con los nitritos (NO_2) se observa que durante todo el período de monitoreo los niveles de este nutriente se mantuvieron en muy bajas concentraciones en toda la bahía de Chetumal, dando como resultado un estado oligotrófico (color amarillo), con excepción del sitio 15 localizado frente al muelle fiscal de la ciudad de Chetumal, que presentó un estado mesotrófico (color naranja) en el mes de abril (secas), por un aumento en la concentración de este nutriente.

En el caso de los nitratos (NO_3) se observa claramente la influencia de las actividades humanas en la calidad del agua de los sitios localizados frente a la

desembocadura del río Hondo (sitio1), la ciudad de Chetumal (sitios 14 a 17) y el poblado de Calderitas (sitio 18), durante las tres épocas climáticas, en dónde se observan un estado mesotrófico (color naranja); mientras que en el resto de los sitios el estado es oligotrófico (color amarillo), es decir, con bajas concentraciones de nitratos.

Tabla 5.- Comparación del Índice Trófico de Karydis para cada nutriente por época climática, en los 18 sitios monitoreados de la Bahía de Chetumal, durante 2017. El color indica el estado trófico, amarillo= Oligotrófico, naranja= Mesotrófico, rojo= Eutrófico.

SITIO	NO ₂			NO ₃			NH ₄			PO ₄		
	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES
1	O	O	O	M	M	M	M	M	O	O	O	O
2	O	O	O	O	M	O	O	O	O	O	O	O
3	O	O	O	O	O	O	O	M	M	O	O	O
4	O	O	O	O	O	O	M	M	O	O	O	O
5	O	O	O	O	O	O	O	M	O	O	O	O
6	O	O	O	O	O	O	M	O	O	O	O	O
7	O	O	O	O	O	O	O	M	M	O	O	O
8	O	O	O	O	O	O	O	M	O	O	O	O
9	O	O	O	O	O	O	M	O	O	O	O	O
10	O	O	O	O	O	O	M	O	O	O	O	O
11	O	O	O	O	O	O	M	O	O	O	O	O
12	O	O	O	O	O	O	M	O	O	O	O	O
13	O	O	O	O	O	O	M	O	O	O	O	O
14	O	O	O	M	M	O	M	O	O	O	O	O
15	M	O	O	M	M	O	M	M	O	O	O	O
16	O	O	O	M	M	O	O	O	O	O	O	O
17	O	O	O	M	O	M	O	M	O	O	O	O
18	O	O	O	M	M	M	O	M	O	O	O	O

La bahía presentó un enriquecimiento de amonio (NH₄) con estados mesotróficos (color naranja) al menos en la mitad de los 18 sitios monitoreados durante las épocas de secas y lluvias, mientras que en la temporada de secas mejora la calidad del agua en casi todo el sistema obteniéndose una condición oligotrófica (color amarillo). Las causas de este enriquecimiento orgánico podrían provenir de las descargas del río Hondo en el sitio 1, de las descargas de aguas pluviales mezcladas con aguas residuales y escurrimientos superficiales en los sitios 14 al 18, de la mineralización de materia orgánica depositada en los sedimentos de los sitios 3 al 14, así como de filtraciones de agua subterráneas en todo el sistema.

Los fosfatos se encontraron en bajas concentraciones durante todo el período de monitoreo, dando como resultado una condición oligotrófica (color amarillo) en todo el cuerpo de agua. Bajos o no detectables niveles de fosfatos son comunes en sistemas acuáticos de zonas carsticas, debido a que presentan un alto

contenido de carbonatos que forman complejos con el fósforo, haciéndolo poco soluble en la columna de agua.

Índice de Condición.-

Este índice de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA, por sus siglas en inglés), se obtiene a partir de los valores de referencia para cada nutriente. Para la bahía de Chetumal, estos valores de referencia se obtuvieron incluyendo a los datos del presente estudio, los generados en los estudios de ECOSUR en 2005 y 2006.

Tabla 6.- Comparación del Índice de Condición (EPA, 1992) para cada nutriente por época climática, en los 18 sitios monitoreados de la Bahía de Chetumal, durante 2017. El color indica la condición, verde= Buena, amarilla= Regular, roja= Pobre.

Sitio	NO ₂			NO ₃			NH ₄			PO ₄		
	Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
1	B	R	R	P	P	R	P	P	P	P	R	B
2	P	B	B	B	P	B	P	P	P	P	B	B
3	B	B	B	B	B	B	P	P	P	P	P	B
4	B	B	B	B	B	B	P	P	R	P	P	B
5	B	B	R	B	B	B	P	P	P	P	P	R
6	B	B	B	B	B	B	P	P	B	P	B	B
7	B	B	B	B	B	B	P	P	P	P	R	B
8	B	B	R	B	B	B	P	P	B	P	B	B
9	B	B	B	B	B	B	P	R	R	R	R	R
10	B	B	B	B	B	B	P	P	B	P	R	B
11	B	B	R	B	B	B	P	P	B	P	R	R
12	B	B	B	B	B	B	P	P	P	P	P	B
13	B	B	R	B	B	B	P	P	B	P	R	B
14	B	P	B	P	P	B	P	R	P	R	B	B
15	P	P	B	P	P	B	P	P	P	P	B	B
16	P	P	B	P	R	B	P	P	P	P	B	B
17	B	P	P	R	B	R	P	P	R	P	R	B
18	B	P	P	P	P	P	P	P	R	R	R	R

Con este indicador cambia el panorama del estado de salud de la bahía de Chetumal. El índice de condición por nutriente y época climática para cada uno de los 18 sitios se presenta en la tabla 6.

En relación con los nitritos (NO₂) la mayor parte de la bahía presenta una condición buena (color verde) en las tres épocas climáticas, con excepción de los sitios 14 al 18 localizados frente a la ciudad de Chetumal y el poblado de Calderitas, dónde la condición es pobre (color rojo); en tanto que en el sitio 1 frente a la desembocadura del río Hondo, durante las temporadas de lluvias y nortes presenta una condición regular (color amarillo).

Para los nitratos (NO_3) la condición es pobre (color rojo) durante las temporadas de secas y lluvias en los sitios 1 y 14 al 16, en tanto que en el sitio 18 ubicado frente al poblado de Calderitas la condición es pobre (color rojo) durante todo el período de monitoreo.

En el caso del amonio (NH_4) durante las épocas de secas y lluvias la condición de la bahía es pobre o regular en los 18 sitios, mientras que para la temporada de nortes mantiene una condición de pobre a regular, con algunos sitios hacia el centro del sistema con condición buena.

La concentración de fosfatos (PO_4) durante el mes de abril (secas) le da a la bahía una condición de pobre a regular, que cambia de regular a buena en lluvias (agosto), y a mayoritariamente buena en nortes (noviembre).

4.3.2.- Laguna Guerrero

Índice Trófico.-

Laguna Guerrero presentó una condición oligotrófica (color amarillo, tabla 7) en la concentración de nitritos (NO_2), fosfatos (PO_4) y nitratos (NO_3), con excepción en este último nutriente de los sitios 4 y 5 que presenta un estado mesotrófico (color naranja) durante el mes de abril (secas). Mientras que para el amonio (NH_4) el sistema es totalmente mesotrófico en época de secas y parcialmente mesotrófica en lluvias y nortes. El enriquecimiento de amonio parece provenir en secas de las filtraciones de agua subterránea mezclada probablemente con aguas residuales y de la descomposición de materia orgánica, mientras que en lluvias y nortes los escurrimientos superficiales y la mineralización de la materia orgánica podrían ser la causa de la condición mesotrófica.

Tabla 7 .- Comparación del Índice Trófico de Karydis para cada nutriente por época climática, en los 5 sitios monitoreados de la Laguna Guerrero, durante 2017. El color indica el estado trófico, amarillo= Oligotrófico, naranja= Mesotrófico, rojo= Eutrófico.

SITIO	NO_2			NO_3			NH_4			PO_4		
	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES
1	O	O	O	O	O	O	M	O	O	O	O	O
2	O	O	O	O	O	O	M	M	M	O	O	O
3	O	O	O	O	O	O	M	M	M	O	O	O
4	O	O	O	M	O	O	M	O	O	O	O	O
5	O	O	O	M	O	O	M	M	O	O	O	O

Índice de Condición.-

Para Laguna Guerrero, los valores de referencia se obtuvieron incluyendo a los datos del presente estudio, los generados en otro estudio de ECOSUR de 2010. En la tabla 8 se presentan los índices de condición obtenidos por nutriente y época climática, en los 5 sitios de monitoreo en la laguna.

Tabla 8.- Comparación del Índice de Condición (EPA, 1992) para cada nutriente por época climática, en los 5 sitios monitoreados de la Laguna Guerrero, durante 2017. El color indica la condición, verde= Buena, amarilla= Regular, roja= Pobre.

Sitio	NO ₂			NO ₃			NH ₄			PO ₄		
	Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
1	P	B	R	P	B	R	P	B	B	P	B	B
2	P	B	P	P	B	R	P	R	B	P	B	B
3	P	B	P	P	B	R	P	B	B	P	B	B
4	P	B	R	P	B	R	P	B	B	P	B	B
5	R	B	R	P	B	B	P	P	B	P	B	B

Durante la temporada de secas la concentración de los nitritos (NO₂), nitratos (NO₃), amonio (NH₄) y fosfatos (PO₄) le dan una condición pobre (color rojo) a la laguna. En lluvias (agosto) su condición es buena (color verde) para los cuatro nutrientes, con excepción de los sitios 2 (regular) y 5 (pobre) para amonio. Mientras que para nortes (noviembre) la condición es buena respecto a fosfatos y amonio, regular para nitratos y de regular a pobre para nitritos.

4.3.3.- Laguna Chile Verde

En esta laguna no se presenta un índice de condición, debido a que el pequeño número de datos del cuerpo de agua no permite obtener valores de referencia. Por lo que solo se analiza el índice trófico.

Índice Trófico.-

En la tabla 9 se observa que Laguna Chile Verde presentó bajas concentraciones de nitritos (NO₂), nitratos (NO₃) y fosfatos (PO₄), que le dan una condición oligotrófica (color amarillo) en las tres temporadas climáticas. Mientras que concentraciones altas de amonio (NH₄) en el sitio 1 durante las tres épocas

climáticas y para la mayoría de los sitios en la temporada de nortes, le dan una característica mesotrófica (color naranja).

Tabla 9 .- Comparación del Índice Trófico de Karydis para cada nutriente por época climática, en los 4 sitios monitoreados de la Laguna Chile Verde, durante 2017. El color indica el estado trófico, amarillo= Oligotrófico, naranja= Mesotrófico, rojo= Eutrófico.

SITIO	NO ₂			NO ₃			NH ₄			PO ₄		
	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES
1	O	O	O	O	O	O	M	M	M	O	O	O
2	O	O	O	O	O	O	O	O	M	O	O	O
3	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
4	O	O	O	O	O	O	O	O	M	O	O	O

Es posible que las fuentes de amonio al sistema provengan principalmente de la mineralización de la materia orgánica de los sedimentos a lo largo del año, y de la resuspensión de materia orgánica a la columna de agua durante la temporada de nortes.

4.3.2.- Laguna Agua Salada

En Laguna Salada tampoco se presenta un índice de condición, debido a que el pequeño número de datos del cuerpo de agua no permite obtener valores de referencia. Por lo que solo se analiza el índice trófico.

Índice Trófico.-

Laguna Salada también presentó bajas concentraciones de nitritos (NO₂), nitratos (NO₃) y fosfatos (PO₄), que le confieren un estado oligotrófico para todo el período de monitoreo. Mientras que las altas concentraciones de amonio (NH₄) le dan características principalmente mesotróficas en lluvias y nortes. De manera interesante, en abril (secas) se observa un gradiente trófico en donde el sitio 1 es eutrófico (color rojo), el sitio 2 es mesotrófico y el sitio 3 oligotrófico (Tabla 10).

Tabla 10 .- Comparación del Índice Trófico de Karydis para cada nutriente por época climática, en los 3 sitios monitoreados de la Laguna Agua Salada, durante 2017. El color indica el estado trófico, amarillo= Oligotrófico, naranja= Mesotrófico, rojo= Eutrófico.

SITIO	NO ₂			NO ₃			NH ₄			PO ₄		
	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES	SECAS	LLUVIAS	NORTES
1	O	O	O	O	O	O	E	O	O	O	O	O
2	O	O	O	O	O	O	M	M	M	O	O	O
3	O	O	O	O	O	O	O	M	M	O	O	O

Las principales fuentes de amonio a la laguna podrían ser las filtraciones de agua subterránea, la descomposición de materia orgánica y su resuspensión a la columna de agua, así como los escurrimientos superficiales durante lluvias y nortes.

4.4.- Identificación y caracterización de las principales fuentes de contaminación.

En seguida se describen las fuentes de contaminación que se identificaron en base al comportamiento espacial y temporal de los diversos indicadores de calidad del agua, en cada uno de los sistemas acuáticos.

4.-4.1.- Bahía de Chetumal

Las fuentes de contaminación orgánica identificadas en este cuerpo de agua son:

- a) Descargas de aguas pluviales potencialmente mezcladas con aguas residuales provenientes de la ciudad de Chetumal, que comprenden los sitios 14 al 17 identificados como Parque Renacimiento, Muelle Fiscal, Punta Estrella y Dos Mulas, respectivamente.
- b) Filtraciones de agua subterránea a lo largo de la línea de costa y en el lecho de la bahía, con alto contenido de nutrientes probablemente debido a lixiviados de fosas sépticas y tiraderos de basura a cielo abierto.
- c) Escurrimientos superficiales a lo largo de la línea de costa durante la temporada de lluvias que predominan sobre las entradas de agua subterránea.
- d) Descarga de agua del río Hondo rica en nutrientes por el uso de fertilizantes en las zonas agrícolas de las riberas de México y Belice, así como de las filtraciones de fosas sépticas de los asentamientos humanos.
- e) Mineralización de nutrientes en zonas de almacenamiento y descomposición de materia orgánica en sedimentos de textura fina de zonas profundas localizadas principalmente al centro de la bahía.

4.4.2. - Laguna Guerrero

Las fuentes de contaminación orgánica identificadas en este cuerpo de agua son:

- a) Filtraciones de agua subterránea combinada con lixiviados de aguas residuales de fosas sépticas de los poblados de Raudales y Luis Echeverría.
- b) Ecurrimientos superficiales a lo largo de la línea de costa durante la temporada de lluvias que predominan sobre las entradas de agua subterránea.
- c) Resuspensión de sedimentos ricos en materia orgánica, principalmente durante la época de nortes cuyos vientos favorecen su mezcla en la columna de agua.
- d) Mineralización de nutrientes por la descomposición de materia orgánica depositada en los sedimentos.

4.4.3. - Laguna Chile Verde

Las fuentes de contaminación orgánica identificadas en este cuerpo de agua son:

- a) Filtraciones de agua subterránea combinada con lixiviados de las actividades agrícolas y ganaderas, dispersas en las zonas aledañas al sistema.
- b) Ecurrimientos superficiales a lo largo de la línea de costa durante la temporada de lluvias que predominan sobre las entradas de agua subterránea.
- c) Resuspensión de sedimentos ricos en materia orgánica, principalmente durante la época de nortes cuyos vientos favorecen su mezcla en la columna de agua.
- d) Mineralización de nutrientes por la descomposición de materia orgánica depositada en los sedimentos.

4.4.2. - Laguna Agua Salada

Las fuentes de contaminación orgánica identificadas en este cuerpo de agua son:

- a) Filtraciones de agua subterránea.

- b) Ecurrimientos superficiales a lo largo de la línea de costa durante la temporada de lluvias que predominan sobre las entradas de agua subterránea.
- c) Resuspensión de sedimentos ricos en materia orgánica, principalmente durante la época de nortes cuyos vientos favorecen su mezcla en la columna de agua.
- d) Mineralización de nutrientes por la descomposición de materia orgánica depositada en los sedimentos.

4.5.- Fortalecimiento del plan de monitoreo de la RESMBCH.

El fortalecimiento del plan de monitoreo de la RESMBCH se realizó mediante el entrenamiento en campo y laboratorio de personal de la SEMA, con la finalidad de desarrollar capacidades a mediano plazo en la evaluación de indicadores de calidad del agua del área natural protegida. Debido a que la Bahía de Chetumal y Bahía Corozal son un solo sistema acuático y los resultados de monitoreo deben ser comparables, también se invitó a participar en el entrenamiento a personal de Sarteneja Alliance for Conservation and Development (SACD) de Belice (Fig. 50).

Un aspecto fundamental de un programa de monitoreo es el aseguramiento de la calidad de los resultados, por lo que el taller de entrenamiento se dividió en dos secciones: a) Preparación de material de colecta en el laboratorio, y b) Muestreo y manejo de equipo de campo. El taller se realizó al inicio del proyecto en las instalaciones de ECOSUR-Unidad Chetumal y en la Bahía de Chetumal, en el que participaron 6 personas. Ambas actividades se describen en seguida.

Preparación de material de colecta en el laboratorio.-

Esta actividad se realizó al inicio de la primera etapa del proyecto, en dónde a los participantes se les proporcionó el procedimiento para el lavado de los envases de colecta de muestras de agua, actividad que realizaron de manera práctica en el Laboratorio de Química de ECOSUR. El lavado de material es una parte fundamental del muestreo, para asegurar que se encuentra libre de compuestos que podrían interferir con los resultados de los indicadores a evaluar, por ejemplo el detergente que se usa debe estar libre de fosfatos para evitar la contaminación

del material de colecta de muestras de agua en las que se determina este parámetro de calidad. Una vez limpio el material de colecta, se les indicó la información que debían contener las etiquetas de los envases, para que su correcta identificación durante su procesamiento analítico y el reporte de los resultados (Fig. 51).



Figura 50.- Personal de SEMA y SCD que participaron en el entrenamiento para la preparación de material de colecta, en el laboratorio de ECOSUR.



Figura 51.- La Ing. Adrina Zavala Mendoza responsable del Laboratorio de Química de ECOSUR, les da instrucciones a los participantes para el lavado y etiquado del material de colecta, de acuerdo al procedimiento proporcionado.

Muestreo y manejo de equipo de campo.-

En las instalaciones de ECOSUR se preparó el equipo de campo que se utilizaría para la colecta de muestras de agua y la medición *in situ* de parámetros fisicoquímicos, como son la botella tipo Van Dorn para la colecta de agua, la draga tipo Van Veen para la colecta de sedimentos, y la sonda multiparamétrica para la medición *in situ* de parámetros fisicoquímicos en la columna de agua.

Una vez preparado el material y equipo de campo en el laboratorio, se realizó una práctica de colecta de muestras de agua y sedimentos, en un sitio de la costa occidental de la Bahía de Chetumal (Fig. 52).

En el sitio se realizaron las actividades siguientes:

1. Mediciones en la columna de agua de los seis parámetros fisicoquímicos que se miden con una sonda multiparamétrica, y su registro en un formato elaborado con la información específica que debe contener de cada sitio (Fig. 53a).
2. Manejo de la botella tipo Van Dorn para la colecta de muestras de agua para la determinación de nutrientes (Fig. 53b).
3. Manejo de la draga tipo Van Veen para la colecta de muestras de sedimentos, con el objetivo de que en otra fase del proyecto de monitoreo de la Bahía de Chetumal se considere la posibilidad del financiamiento para la determinación de contaminantes orgánicos persistentes que se depositan en este compartimiento ambiental, y que son tóxicos para los seres vivos (Fig. 53 c).
4. Manejo y conservación de las muestras en hielo para su transporte al laboratorio de ECOSUR.



Fig. 52.- Preparación y transporte del equipo de campo y material de colecta, a un punto de muestreo en la costa occidental de la Bahía de Chetumal.



Fig. 53.- Entrenamiento en (a) el uso de una sonda multiparamétrica para la medición de parámetros fisicoquímicos y su registro en un formato, (b) operación de una botella tipo Van Dorn para la colecta de muestras de agua y su conservación para su transporte al laboratorio, y c) operación de una draga tipo Van Veen para la colecta de sedimentos.

Entrenamiento durante el monitoreo en la RESMBCH.-

Es importante mencionar que como parte del fortalecimiento de capacidades del personal de la SEMA para que puedan mantener un plan de monitoreo a largo plazo, se continuó durante los tres períodos de monitoreo con el entrenamiento en la colecta y conservación de muestras de agua y sedimentos para su transporte, así como la medición *in situ* de parámetros fisicoquímicos con la sonda multiparamétrica (Fig. 54, 55, 56, 57 y 58).



Figura 54.- El técnico de ECOSUR Alejandro Ortiz Arana, le da instrucciones a Mateo Sabido de SEMA sobre la forma de operar la botella tipo Varn Dorn para la colecta de muestras de agua.



Figura 55.- Mateo Sabido de SEMA realiza la colecta de muestras de agua con la botella Van Dorn y deposita la muestra en frascos etiquetados para su almacenamiento y transporte al laboratorio de ECOSUR.



Figura 56.- Angel Gómez de SEMA utiliza la draga tipo Van Veen para la colecta de una muestra de sedimentos en la Bahía de Chetumal, y Juan Pastor de la Procuraduría de Protección al Ambiente del Estado de Quintana Roo transfiere la muestra a un frasco para su transporte.



Figura 57.- Se realiza la medición de parámetros fisicoquímicos con una sonda multiparamétrica HORIBA en un sitio de monitoreo y se depositan muestras de sedimentos en una hielera para su transporte al laboratorio de ECOSUR.



Figura 58.- Victor Hernández y el Sr. Heladio, ambos personal de SEMA, participan en el traslado a los sitios de monitoreo, la colecta de muestras y su transporte al laboratorio de ECOSUR.

5.- DISCUSIÓN

Los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CECAs) (SEDUE, 1989) han sido utilizados como referencia para determinar la salud de los cuerpos de agua en México, a partir de límites máximos permisibles (LMP) de diferentes parámetros químicos para la protección de la vida acuática en general. Estos LMP son de diferente magnitud si se evalúan cuerpos de agua dulce o cuerpos de agua marina o salobre.

Las limitaciones de uso de esta guía de calidad del agua se deben a que se considera que en México todos los cuerpos de agua son similares en sus características fisicoquímicas, sin embargo esto no es así. Por ejemplo, los sistemas acuáticos de naturaleza karstica como los evaluados en este estudio, naturalmente presentan bajas concentraciones de nutrientes como nitrógeno (N) y fósforo (P), por lo que un incremento en los niveles naturales de N y P inferiores a los valores de LMP establecidos en los CECAs, podrían aun así tener un impacto negativo en el sistema acuático. Lo anterior representa para este estudio, que en los sitios en donde las concentraciones de los nutrientes fueron inferiores a los LMP establecidos en los CECAs, no significa que la calidad del agua sea buena y segura para la protección de su vida acuática. Por ello es que se utilizan otros indicadores como los índices tróficos y de condición, que permiten integralmente determinar la calidad de un cuerpo de agua.

El índice trófico de Karydis utilizado en este estudio, indica el grado de eutrofización de un cuerpo de agua, para cada nutriente y para cada sitio; y proporciona una valoración de la calidad del agua en el momento de su medición. El proceso de eutrofización consiste en el aumento de la producción de materia orgánica como resultado del incremento en la adición de nutrientes principalmente nitrógeno y fósforo (Herrera-Silveira et al., 2003). En el presente estudio, el índice trófico indicó que en general los cuatro cuerpos de agua fueron oligotróficos (bajos en nutrientes) para nitritos, nitratos y fosfatos; y mesotróficos para amonio.

Debido a la enorme variabilidad que existe en las concentraciones de nutrientes entre los sistemas acuáticos, que puede conducir a subestimar o sobrestimar la condición de cada sistema; la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés) recomienda determinar la calidad de un cuerpo de agua a partir del desarrollo de los valores de referencia para cada nutriente. Estos valores de referencia proporcionan una medida confiable de la calidad del agua en condiciones naturales, es decir, permiten establecer en el tiempo la concentración natural de cada parámetro que indica una buena condición. Por el contrario, valores superiores a esta concentración natural, indican una disminución de la calidad del agua (regular o pobre), producto del

enriquecimiento orgánico proveniente de diversas fuentes de contaminación. Desafortunadamente, este Índice de Condición solo pudo determinarse para la Bahía de Chetumal y la Laguna Guerrero, debido a que se contaban con datos históricos de otros estudios realizados por ECOSUR, para calcular los valores de referencia. De ahí la importancia de mantener el monitoreo a largo plazo de los diversos indicadores de calidad del agua en la RESMBCH.

6.- CONCLUSIONES

En base a los objetivos específicos planteados en este estudio, se concluye lo siguiente para los cuatro cuerpos de agua:

- 1.- La calidad del agua es mala en relación con el amonio para la protección de la vida acuática de agua dulce y salobre, debido a que su concentración durante el período de monitoreo fue superior al límite máximo permisible establecido por los CECAs.
- 2.- En relación con la variabilidad espacial, se observó que los sitios cercanos a los asentamientos humanos y en dónde se llevan a cabo diversas actividades humanas, presentaron las concentraciones más altas en todos los nutrientes y que además rebasaron los LMP de los CECAs.
- 3.- En relación con la variabilidad temporal se observó que en el mes de abril (época de secas), se registraron las concentraciones más altas de nutrientes, principalmente de amonio y fosfatos, seguida de la temporada de lluvias (agosto) con nitritos y amonio, y en el mes de noviembre (nortes) solo de amonio.
- 4.- De acuerdo al índice trófico de Karidys, la RESMBCH presenta una condición oligotrófica para nitritos, nitratos y fosfatos, y un estado mesotrófico debido a enriquecimiento orgánico por amonio.
- 5.- La Bahía de Chetumal presentó en general una condición pobre para amonio y fosfatos, y una condición buena para nitritos y nitratos durante las tres épocas

climáticas. En tanto que la Laguna Guerrero solo presentó una condición pobre para los cuatro nutrientes solo en la temporada de secas (abril).

6.- Las principales fuentes de contaminación identificadas fueron en general: a) las filtraciones de agua subterránea conteniendo lixiviados de las diversas actividades humanas, b) los escurrimientos superficiales durante la temporada de lluvias principalmente, c) la mineralización de materia orgánica depositada en los sedimentos, y en particular para la Bahía de Chetumal d) la descarga del río Hondo.

7.- RECOMENDACIONES

La principal recomendación es mantener un programa de monitoreo a largo plazo de los diversos indicadores de calidad del agua, que permita calcular valores de referencia para las lagunas Chile Verde y Salada; y de esta manera contar con los mismos indicadores en toda la RESMBCH.

El monitoreo a largo plazo también permitirá alimentar las bases de datos para calcular los diversos indicadores de calidad del agua y observar su comportamiento espacial y temporal, que ayudará a los tomadores de decisiones no solo a determinar las acciones para mejorar o mantener la calidad del agua de la RESMBCH, sino también a evaluar si las acciones son efectivas o hay que cambiarlas.

8.- AGRADECIMIENTOS

Este proyecto contó con el financiamiento, gestión administrativa y apoyo operativo, de las instituciones siguientes: Mesoamerican Reef Fund (MAR Fund), Cooperación Alemana (Deutsche Zusammenarbeit), Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza A.C. (FMCN), PRONATURA Península de Yucatán A.C., Santuario del Manatí perteneciente a la Secretaría de Ecología y Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Quintana Roo y El Colegio de la Frontera Sur-Unidad Chetumal (ECOSUR).

9.- REFERENCIAS

- Alvarez-Legorreta, T. y L. Carrillo-Briebiezca. 2011. Desarrollo de indicadores de calidad del agua en lagunas costeras y continentales de Quintana Roo para el diseño e implementación de un programa de monitoreo estatal. Conacyt-Fondos Mixtos. QROO-2009-C01-123254. 174 p.
- Carrillo, L., E. Palacios-Hernández, M. Yescas and AM. Ramírez-Manguilar. 2009. Spatial and Seasonal Patterns of Salinity in a Large and Shallow Tropical Estuary of the Western Caribbean. *Estuaries and Coasts*, 32:906–916.
- Chapman, D. 1996. *Water Quality Assessments- A guide to use of biota, sediments and water in environmental monitoring-Second Edition*. WHO by F & FN Spon. 651 p.
- EPA. 1992. *An Updated Summary of Status and Trends in Indicators of Nutrient Enrichment in the Gulf of México*. U.S. Environmental Protection Agency Office of Water, gulf of México Program, United States of America, 272 pp
- EPA. 2001. *National Coastal Assessment: Field operations manual*. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Health and Environmental Effects Research Laboratory, Gulf Ecology Division, Gulf Breeze, F.L. EPA/620/R-01/003. pp 72.
- Herrera-Silveira, J.A. Nancy Aranda Cirerol, Luis Troccoli Ghinaglia, Francisco A. Comín y Chris Madden. 2003. Eutrofización Costera en la Península de Yucatán. 823-850p. En: M. Casso, I. Pisanty & E Ecurra (Cmps.) *Diagnóstico Ambiental del Golfo de México*. Vol.2, SEMARNAT, INE, Inst de Ecología, A.C., Harte Research .
- INEGI. 2010. *Censo de Población y Vivienda 2010*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. MEX-INEGI.40.201.01-CPV-2010. <http://www3.inegi.org.mx/rnm/index.php/catalog/71/>
- Karydis, M., L. Ignatiades and N. Moschopoulou. 1983. An index associated with nutrient eutrophication in the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 16: 339-344.
- Murphy, J. and J.P. Riley. 1962. Modifies single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Chemical Acta*, 27.
- Parsons, T.R., Y. Maita and C.M. Lalli. 1984. *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, Oxford.
- SEDUE. 1989. *Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001-89*. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. Diario Oficial 13 de diciembre de 1989, 17 p.

10.- ANEXOS

Se entregan anexos seis archivos en Excel de las bases datos siguientes:

- 1.- Físicoquímicos.- comprende tres bases de datos, una por cada época climática (secas, lluvias y nortes). Cada base contiene datos de los parámetros

fisicoquímicos: temperatura, pH, oxígeno disuelto, turbidez, salinidad y conductividad; correspondientes a 18 sitios de la bahía de Chetumal, 5 sitios de Laguna Guerrero, 4 sitios de Laguna Chile Verde y 3 sitios de Laguna Salada.

2.- Nutrientes.- comprende tres bases de datos, una por cada época climática (secas, lluvias y nortes). Cada base contiene datos de los parámetros: nitritos, nitratos, amonio, fosfatos, silicatos y clorofila a; correspondientes a 18 sitios de la bahía de Chetumal, 5 sitios de Laguna Guerrero, 4 sitios de Laguna Chile Verde y 3 sitios de Laguna Salada.