



## **Cálculo de un índice de calidad del agua en un cuerpo de agua: estudio de caso lagunas Chacahua y Pastoría, Oaxaca**

Rafael A. Guajardo-Panes<sup>1</sup>, Finlandia Barbosa-Moreno<sup>2\*</sup>, Gabriel Díaz-Padilla<sup>1</sup> e Ignacio Sánchez-Cohen<sup>3</sup>.

<sup>1</sup>INIFAP. Sitio Experimental Teocelo/Campo Experimental Cotaxtla. Km. 3.5 Carr. Xalapa-Veracruz, Xalapa, Veracruz. C.P. 91190, México.

<sup>2</sup>INIFAP. Campo Experimental Valles Centrales. Melchor Ocampo No. 7, Santo Domingo Barrio Bajo. Villa de Etna, Oaxaca. C.P. 68200. México.

<sup>3</sup>INIFAP. CENID-RASPA. Parque Industrial II, Gómez Palacio, Durango. C.P. 34079. México.

\*Autor de correspondencia: [barbosa.finlandia@inifap.gob.mx](mailto:barbosa.finlandia@inifap.gob.mx)

Recibido 15 de agosto de 2020; aceptado 21 de septiembre de 2020

### **RESUMEN**

El presente trabajo plantea una propuesta para cuantificar la calidad del agua en humedales, se describe el proceso metodológico para determinar el número mínimo de muestras de agua y los puntos específicos donde se realice la toma de éstas en las lagunas de Chacahua y Pastoría del estado de Oaxaca, los cuales se identificaron con su respectiva posición geográfica. Se realizó el análisis exploratorio de los indicadores registrados y se determinó un índice de calidad de agua (*ICA*) empleando datos temperatura del agua, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales, dureza y cloruros registrados en 70 puntos distribuidos en ambas lagunas. Las muestras se tomaron antes y durante el periodo de lluvias para identificar si éste fenómeno influye en el índice. Se analizaron los datos para verificar bondad de ajuste a la distribución normal, y se empleó t-student o Mann-Whitney para contrastar la hipótesis

de igualdad de medias o medianas, según fuera el caso. Se observó que la concentración de los elementos es similar en ambas lagunas excepto en el registro de oxígeno disuelto en la temporada previa al periodo de lluvias (*valor*  $p=0.2422$ ). Con el proceso de interpolación Inverso de la Distancia (*IDW*), se observó la variación espacial y temporal de cada una de las variables. En general, la calidad del agua varía de contaminado a poco contaminado en ambas lagunas, sin embargo, la laguna de Pastoría registra valores de *ICA* entre 43.86 y 47.15, que están por debajo de los registrados en Chacahua (45.50 a 50.88) en el primer muestreo, mientras que para el segundo muestreo los valores varían de 45.16 a 52.33 en Pastoría y de 47.18 a 53.87 para Chacahua; lo cual indica que la lluvia no influye en la calidad del agua en ambos cuerpos de agua.

**PALABRAS CLAVE:** Muestra, *ICA*, lagunas, espacio-tiempo, interpolación.

#### ABSTRACT

This work presents a proposal to quantify the quality of water in wetlands, the methodological process is described to determine the minimum number of water samples and the specific points where they are taken in the Chacahua-Pastoría lagoon complex of the state of Oaxaca which were identified with their respective geographic position. After obtaining the results, an exploratory analysis of the registered indicators was carried out and a water quality index (*WQI*) was determined using data temperature of the water, electrical conductivity, pH, dissolved oxygen, total dissolved solids, hardness and chlorides registered in 70 points distributed in both lagoons. The samples were taken before and during the rainy season to identify if this phenomenon influences the index. The data were analyzed to check the goodness of fit to the normal distribution, in order to define the use of the t-Student test or the Mann-Whitney test to test the hypothesis of equality of means or medians, as the case may be. It was observed that the concentration of the elements is similar in both lagoons, except for the dissolved oxygen record in the season prior to the rainy season (*p-value*=0.2422). With the Inverse Distance interpolation process (*IDW*), the spatial and temporal variation of each of the variables was observed. In general, the quality of the water varies from contaminated to slightly contaminated in both lagoons, however, the Pastoría lagoon registers *WQI* values between 43.86 and 47.15, which are below those

registered in Chacahua (45.50 to 50.88) in the first sampling, while for the second sampling the values vary from 45.16 to 52.33 in Pastoría and from 47.18 to 53.87 for Chacahua; which indicates that rain does not influence the quality of the water in both bodies of water.

**KEY WORDS:** Sample, *WQI*, lagoons, space-time, interpolation.

## **INTRODUCCIÓN**

El deterioro de la calidad del agua se ha convertido en motivo de preocupación a nivel mundial, ya que con el crecimiento de la población, la expansión de la actividad agro-industrial y la amenaza del cambio climático causan importantes alteraciones en el ciclo hidrológico, el cual incide en la deposición del vital líquido a través de la precipitación en las cuencas y que a través de escurrimientos e infiltraciones se deposita en cuerpos de agua que pueden encontrarse a diferentes gradientes altitudinales e incluso en áreas que se encuentran conectadas al mar y que comúnmente se llaman humedales y/o manglares que son fuente de agua y sustento económico para los habitantes que se encuentran alrededor de dicho entorno y que debido a esto la calidad del agua debe ser regularmente monitoreada.

Un humedal contempla un área de suelo saturado por agua, esta condición depende de las épocas del año. Se encuentran inundados por agua dulce, salobre o salina y pueden ubicarse en regiones ribereñas, costeras o marinas que no excedan los seis metros de profundidad. Son ecosistemas complejos que actúan como interface entre hábitats terrestres y acuáticos. Es considerado uno

de los entornos más productivos del mundo, además de que son cuna de diversidad biológica, fuente de agua y productividad primaria de innumerables especies vegetales y animales. Sus particularidades han hecho que estos hábitats sean vulnerables debido a la calidad del agua que en ellos se encuentra. La calidad del agua se considera una medida de idoneidad de parámetros físicos, químicos y biológicos para un uso particular seleccionado (USGS, 2017). Sin embargo, puede ser evaluada por un solo parámetro para cierto objetivo, o bien, por una serie de parámetros críticos seleccionados cuidadosamente para representar el nivel de contaminación del cuerpo de agua y reflejar su estado (Calvo y Mora, 2012) (Gazzaz et al., 2012).

Es importante conocer el índice de calidad de agua que se tiene en el complejo lagunar puesto que los habitantes de los alrededores ocupan esos cuerpos de agua para diversas actividades, con el antecedente de que está contaminada (Arriaga et al., 2002 y CONABIO et al., 2007). Además de que es una aportación constructiva para los interesados en el tema, el saber los parámetros para el cálculo, la variación entre lagunas antes y durante la lluvia, el uso que se les puede proporcionar.

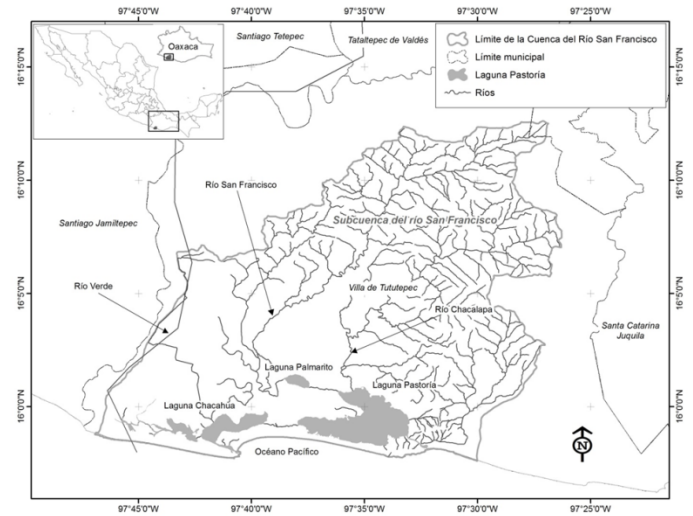
El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una

propuesta de esquema de muestreo para realizar la colecta de agua en puntos aleatorizados de las lagunas de Chacahua y Pastoría con el fin de examinar la variabilidad espacial, así como realizar la cuantificación de la calidad del agua en diferentes condiciones de temporal, es decir, antes, durante y después de la época de lluvias.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Delimitación del área de estudio.

Las lagunas Chacahua y Pastoría se ubican en la subcuenca del río San Francisco, dentro de la cuenca del río Colotepec de la región hidrológica Costa de Oaxaca; forman parte de un área natural protegida (RAMSAR) que se localiza entre los  $97^{\circ}46'12''$  y los  $97^{\circ}32'02''$  de longitud oeste y  $15^{\circ}57'47''$  y  $16^{\circ}00'58''$  de latitud norte. Ambas lagunas ocupan un área de 3,423 ha, de las cuales 2,174 ha pertenecen a la laguna de Pastoría y 1,249 ha a la laguna de Chacahua. Sus límites se encuentran al oeste con el Río Verde, en tanto que al este colindan con la subcuenca del Río Grande y al sur con el Océano Pacífico. El sistema lagunar cuenta con las vertientes del Río San Francisco, Chacalapa y algunos arroyos temporales (Salinas y Jiménez, 2008) (Figura 1).



**Figura 1.** Ubicación del complejo lagunar Chacahua-Pastoría, Oaxaca-México.

Con el panorama geográfico se definió la población objetivo a la cual fue necesario segmentar en cuadrículas para identificar las unidades de muestreo.

### Muestreo en las lagunas.

Un muestreo de agua implica el intento por establecer, a partir de muestras representativas, la calidad fisicoquímica y microbiológica predominante (Luna et al., 2004), en consecuencia, la definición de los puntos requeridos se definió a partir de la división cuadriculada de cada una de las lagunas y la superficie de cada cuadrícula es de una hectárea, con los cuales fue posible conformar el marco muestral para cada laguna mediante aleatorización en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Cada cuadrícula forma parte de las unidades de

muestreo en el marco muestral y para identificarlo se calculó su centroide, el cual se obtuvo con las ecuaciones siguientes:

$$C_x = \frac{1}{4 \times A} \sum_{i=0}^{N-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \text{ Ecuación 1}$$

$$C_y = \frac{1}{4 \times A} \sum_{i=0}^{N-1} (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \text{ Ecuación 2}$$

dónde:

$$A = l \times l \text{ Ecuación 3}$$

Los valores de  $C_x$  y  $C_y$  son los valores de latitud y longitud del centroide de cada cuadrícula, la cual puede seleccionarse a través de un proceso de aleatorización geográfica; previamente se calculó el tamaño de muestra y se estratificó con el método de afijación óptima que consiste en distribuir la muestra total en cada laguna considerando el número de centroides contenidas en cada una de ellas aplicando la siguiente ecuación:

$$n_i = \frac{N_i * n * s_i}{(N_1 * s_1) + (N_2 * s_2) + \dots + (N_n * s_n)} \text{ Ecuación 4}$$

dónde:

$n_i$ = número de unidades de muestreo asignados a la laguna  $i$ .

$N_i$ = número de unidades en el marco muestral de la laguna  $i$ .

$n$ = número total de unidades de muestreo calculados en la Ecuación 5.

$s_i$ = desviación estándar de superficie de huertos en el estrato  $i$ .

### Esquema de muestreo

Para completar el muestreo en las lagunas, se requirió calcular el tamaño de muestra que permita realizar la estimación de lo que sucede en la población objetivo para evitar gastos excesivos e inconsistencia de los resultados. Por lo que se consideró un nivel de exactitud y un margen de error permisible para estimar los parámetros poblacionales lo más cercano a la realidad (Pimienta, 1999). Para calcular el tamaño de muestra se requirió: 1) Identificar la población objetivo, a la cual realizaremos la medición de los indicadores de interés, es decir, las lagunas de Chacahua y Pastoría; 2) Establecer un margen de error, el cual exprese la variación por la que se erre en el pronunciamiento de los resultados; 3) Calcular intervalos aleatorios para acotar un estimador con determinadas probabilidades; y 4) Un índice numérico de la dispersión del conjunto de datos, que proviene, regularmente de estudios previos. Cada uno de estos

elementos se concentra en el planteamiento de un muestreo aleatorio simple y que se muestra en la Ecuación 5.

$$n = \frac{N\sigma^2}{(N-1)D + \sigma^2} \quad \text{Ecuación 5}$$

dónde:

$$D = \frac{B^2}{Z_0} \quad \text{Ecuación 6}$$

En la Ecuación 5, la  $N$  representa el número total de celdas de una hectárea que inciden en ambas lagunas;  $\sigma^2$  es la varianza poblacional del indicador con mayor variabilidad registrada en estudios previos;  $B$  es límite de error de estimación y  $Z_0$  es el valor de probabilidad de la función normal estándar para un nivel de confianza establecido. Para éste estudio de caso, el tamaño de muestra se calculó considerando niveles de confianza al 80, 85, 90, 95 y 99% a diferentes márgenes de error que contempla el 5, 10, 15 y 20%.

Para obtener el valor de  $\sigma^2$ , se realizó el análisis exploratorio de indicadores sobre calidad del agua que realizó la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) entre los años 2012 y 2016 en el mismo complejo lagunar, se eligió la que reportó mayor variabilidad.

Adicionalmente, se consideró la temporalidad de toma de muestras, la cual se estableció a partir de la información generada del análisis de la presencia

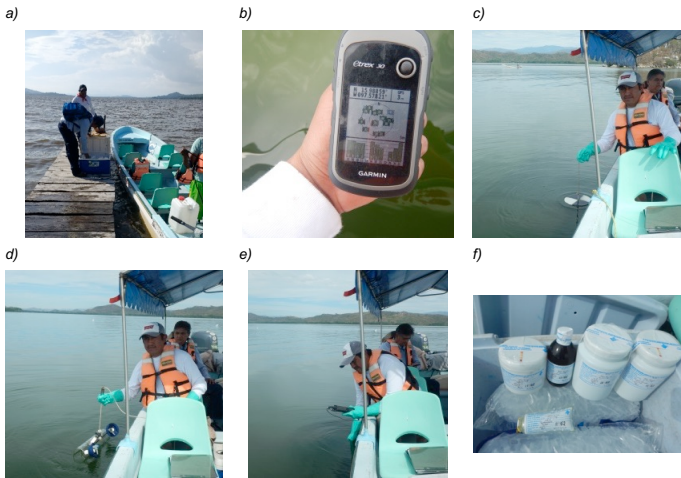
histórica de la temporada de lluvias considerando las estaciones climáticas listadas en el Cuadro 1, con el fin de identificar patrones en la presencia de los elementos medidos en las lagunas ya que este factor se espera que influya en la calidad del agua por lo que fue necesario realizar la toma de muestras antes y durante la temporada de lluvias.

**Cuadro 1.** Relación de estaciones consideradas en el estudio para definir la temporalidad de toma de muestras de agua en cada laguna.

Clave de Estación	Nombre de estación	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Periodo de registro
20047	Santa Catarina Juquila (CFE)	16°13'59" N	97°17'59" W	1,690	1961 - 2000
20086	Paso de la Reina	16°15'37" N	97°37'00" W	438	1960 - 1988
20098	Río grande	16°00'39" N	97°25'59" W	27	1968 - 1988
20223	CAE Río grande	16°01'00" N	97°34'00" W	70	1973 - 1988
20251	ETA Santiago Jamiltepec	16°04'59" N	97°46'00" W	17	1975 - 1980
20381	Zapotallillo	15°59'06" N	97°33'01" W	5	1982 - 1988

### Toma de muestras

Para realizar la toma de muestras se realizaron recorridos en lancha (Figura 2a) con uso de un sistema de geoposicionamiento (GPS) Garmin Etrex 30® (Figura 2b) para arribar al punto de muestreo; en cada sitio se realizó la medición de penetración luminosa (turbidez) con un disco de Secchi (Figura 2c) y con un muestreador de agua horizontal en acrílico (Figura 2d) se tomaron muestras superficiales de agua (< 15 cm).



**Figura 2.** Imágenes relacionadas con la toma de muestras de agua en las lagunas de Chacahua y Pastoría en Oaxaca.

Adicionalmente, se empleó un medidor óptico de oxígeno disuelto/conductividad; y un multímetro portátil para mediciones de pH, conductividad, salinidad, sólidos disueltos totales, oxígeno disuelto, potencial antioxidante y electrodos de iones específicos en agua (Figura 2e) y las muestras de agua se envasaron y etiquetaron para su envío a un laboratorio acreditado para su posterior análisis (Figura 2f).

### Análisis de muestras en laboratorio

Las muestras fueron tratadas y analizadas de acuerdo a estrictas normas en el manejo que exigen distintas normas mexicanas en un laboratorio acreditado por la Entidad Mexicana de Acreditación A.C. (EMA). En el Cuadro 2, se muestra un listado de las variables que

fueron consideradas en el estudio y que se cuantificaron en campo y en laboratorio.

**Cuadro 2.** Relación de indicadores considerados en el estudio, su unidad de medida y norma oficial bajo la cual fue cuantificada.

Variable	Unidad	Método de prueba	Variable	Unidad	Método de prueba
conductividad	(mS/cm)	NMX-AA-093-SCFI-2000	Potasio	(mg/L)	NMX-AA-051-SCFI-2016
temperatura del agua	(°C)	NMX-AA-007-SCFI-2013	Sodio	(mg/L)	NMX-AA-051-SCFI-2016
oxígeno disuelto	(mg/L)	NMX-AA-012-SCFI-2001	Sulfatos	(mg/L)	NMX-AA-074-SCFI-2014
acidez	UNT	NMX-AA-038-SCFI-2001	Fosforo	(mg/L)	EPA 365.1 1993
H	Unidad	NMX-AA-008-SCFI-2016	Nitrógeno total kjeldahl	(mg/L)	EPA 351.2 1993
oliformes totales	(UFC/100 mL)	NMX-AA-042-SCFI-2015	Nitrógeno total	(mg/L)	CÁLCULO
olor platino cobalto	(U Pt-Co)	NMX-AA-045-SCFI-2001	Nitrógeno de nitritos	(mg/L)	EPA 353.2 1993
sólidos disueltos totales	(g/L)	NMX-AA-034-SCFI-2015	Nitrógeno amoniacal	(mg/L)	EPA 350.1 1993
potencial redox superficial	(mV)	SM 2580 Método A SM 2580 B	Nitrógeno orgánico	(mg/L)	CÁLCULO
presión atmosférica	(mmHg)	Valor a la corrección de % de acuerdo a la presión atmosférica	Nitrógeno de nitratos	(mg/L)	EPA 353.2 1993
luminio	(mg/L)	NMX-AA-051-SCFI-2016	Carbonatos	(mg/L)	SM-TABLE 2320 II Page: 2-28
calcio	(mg/L)	NMX-AA-051-SCFI-2016	Bicarbonatos	(mg/L)	SM-TABLE 2320 II Page: 2-28
hierro	(mg/L)	NMX-AA-051-SCFI-2016	Cloruros	(mg/L)	NMX-AA-073-SCFI-2001
magnesio	(mg/L)	NMX-AA-051-SCFI-2016			

Los reportes de cada una de las muestras recolectadas fueron entregadas por escrito y capturadas en una base de datos en Microsoft Excel<sup>®</sup> para su posterior manejo y análisis.

### Análisis de datos

#### Estadística

Una vez que se contó con la información de los resultados de laboratorio de cada una de las muestras de agua, se conformó una base de datos en Excel y analizada con el software R (R Core Team, 2018), se realizó análisis



exploratorio con estadísticas descriptivas, gráficos de cajas y alambres e histogramas para identificar datos anómalos e identificar la distribución de los datos. Se aplicaron pruebas de normalidad de Anderson-Darling (Anderson y Darling, 1954) para definir que variables analizar con la prueba t-Student (Student, 1908) y en que otras emplear la prueba de Mann-Whitney (Mann y Whitney, 1947), con el fin de verificar si existen diferencias entre observaciones tanto entre lagunas como etapas de muestreo.

### Espacial

Dado que los resultados de laboratorio cuentan con referencia geográfica, se incorporaron a un sistema de información geográfica QGIS (QGIS Development Team, 2019), de código abierto y con herramientas para el análisis geoestadístico de datos y de procesos de interpolación, que para el presente caso, se consideró Inverso de la Distancia (IDW, por sus siglas en inglés) (Philip y Watson, 1982), el cual consiste en ponderar el valor de los puntos existentes de acuerdo a la distancia de los puntos que estén alrededor del área al punto que se estimará el dato, dando como resultado una o varias capas llamadas ráster o grid que dan forma a un mapa digital (Díaz et al., 2008).

### Cálculo de Índice de Calidad del Agua

Se encuentran disponibles diferentes metodologías para calcular el Índice de Calidad del Agua (*ICA*), los cuales involucran diferentes parámetros y estos pueden ser de carácter aditivo y multiplicativo, siendo éstos últimos los más sensibles a la variación de los parámetros, además de que reflejan con mayor precisión un cambio de calidad del agua (Landwehr y Denninger, 1976). En el presente estudio se aplicó una variación de los *ICA* propuestos por (Dinius, 1987) y el Instituto de Ingeniería de la UNAM (1974) considerando la propuesta de (Brown y McClelland, 1973) en el que se considera una técnica multiplicativa y que se expresa como:

$$ICA = \prod_{i=1}^n [Q_i^{W_i}] \quad \text{Ecuación 7}$$

dónde:

$W_i$  son los pesos específicos asignados a cada parámetro y ponderados entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria igual a uno.

$Q_i$  es la calidad del parámetro en función de su concentración y cuya calificación oscila entre 0 y 100.

$\Pi$  representa la operación multiplicativa de las variables correspondientes a la temperatura del agua (*Temp*), conductividad eléctrica (*CE*), *pH*, oxígeno disuelto (*OD*),

sólidos disueltos totales (*SDT*), dureza (*D*) y cloruros (*Clrs*).

Cada una de estas variables se encuentra representada en *Q* y se elevan a la *W* potencial (León V., 1991) y la ecuación queda conformada como:

$$ICA = Q_{Temp}^{0.15} \times Q_{CE}^{0.10} \times Q_{pH}^{0.25} \times Q_{OD}^{0.25} \times Q_{SDT}^{0.10} \times Q_D^{0.10} \times Q_{Clrs}^{0.05} \quad \text{Ecuación 8}$$

Los intervalos del *ICA* generales se resumen en el Cuadro 3, el cual se encuentra clasificado de acuerdo a la CONAGUA, Gerencia de Saneamiento y Calidad del agua (2002).

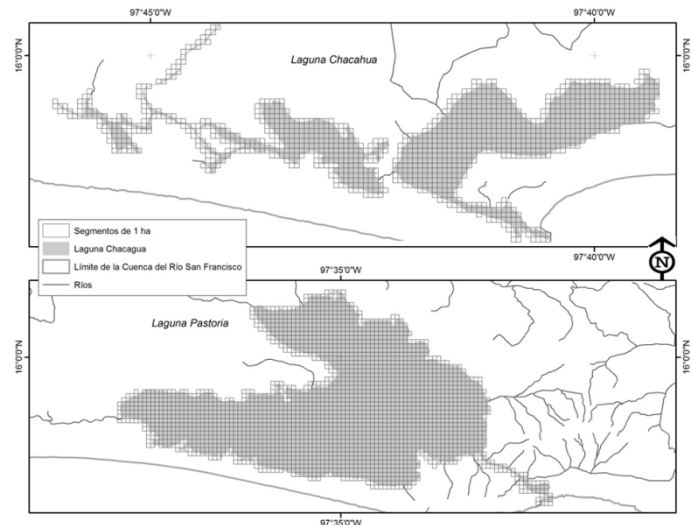
**Cuadro 3.** Escala de clasificación del *ICA*.

ICA		USOS DEL AGUA				
Valor (%)	Criterio general	Abastecimiento Público	Recreación General	Pesca y vida acuática	Industrial y agrícola	Navegación
100	No contaminado	No requiere purificación	Aceptable para cualquier deporte acuático	Aceptable para todos los organismos	No requiere purificación	A c e p t a b l e
90		Requiere purificación ligera			Requiere purificación ligera para algunos procesos	
80	Aceptable	Mayor necesidad de tratamiento	Aceptable más no recomendable	Aceptable, excepto para especies muy sensibles Dudoso para especies sensibles	No requiere tratamiento para uso en la industria	
70						
60	Poco contaminado	Dudoso	Dudoso	Sólo organismos muy resistentes	Requiere tratamiento para uso en la mayor parte de la industria	
50						
40	Contaminado	Inaceptable	Evitar contacto con el agua	Inaceptable	Uso muy restringido	
30			Señal de contaminación			
20	Altamente contaminado	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable	Inaceptable	
10						
0						

Nota: Los intervalos de las categorías del ICA son: 0-29 %, Altamente contaminado; 30%-49%, Contaminado; 50%-69%, Poco contaminado; 70%-84%, Aceptable; 85%-100%, No contaminado. La escala actual incluye diferencias tanto en algunos intervalos como en las denominaciones de algunas categorías respecto de las que se publicaron en la edición anterior de esta obra, lo cual obedece a que se busca tanto describir técnicamente de mejor manera lo que en la naturaleza ocurre, como lograr una mejor interpretación de la calidad del agua en el ámbito nacional.

## RESULTADOS

Los cuerpos de agua que comprenden las lagunas de Chacahua y Pastoría, fueron segmentadas en un total de 3,559 cuadrantes de una hectárea, las cuales se desagregan en 1,188 y 2,371, respectivamente. Es así como en la Figura 3, se muestra la conformación del marco muestral en ambas lagunas.



**Figura 3.** Marco muestral en las lagunas de Chacahua y Pastoría, Oaxaca-México.

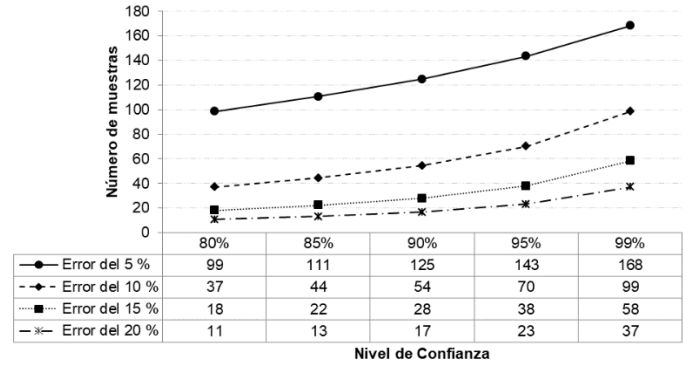
Por medio del análisis de varianza de indicadores tomados de las muestras piloto recabadas por la CONAGUA, se encontraron diferencias significativas a través de meses. En el Cuadro 4, se observa que el contenido de los indicadores mostró diferencias significativas en los distintos puntos de muestreo y en los meses en que fueron recabados los datos.

**Cuadro 4.** Resultados de análisis de varianza a través de los meses en monitoreo realizado por la CONAGUA.

Variables	Muestras piloto	Media	Desviación estándar	Diferencias significativas		
				Puntos de muestreo	Mes	Año
Absorción de rayos UV	198	0.15	0.11	0.000 (***)	0.000 (***)	0.000 (***)
Clorofila	188	2.73	7.05	0.011 (*)	0.003 (**)	0.723 (ns)
Color Verdadero	178	29.94	23.60	0.003 (**)	0.015 (*)	0.000 (***)
Conductividad de campo	200	39,425.00	19,426.00	0.003 (**)	0.000 (***)	0.000 (***)
Carbono orgánico total	199	11.19	9.44	0.002 (*)	0.000 (****)	0.153 (ns)
Carbono orgánico soluble	191	6.31	5.17	0.000 (***)	0.000 (***)	0.019 (*)
Nitrógeno amoniacal	168	0.16	0.25	0.295 (ns)	0.128 (ns)	0.435 (ns)
Nitratos	168	0.22	0.22	0.815 (ns)	0.000 (***)	0.000 (***)
Nitrógeno orgánico	165	0.54	1.84	0.918 (ns)	0.707 (ns)	0.409 (ns)
Oxígeno disuelto en mg/l	201	5.23	1.26	0.041 (*)	0.002 (**)	0.000 (***)
Oxígeno disuelto en la superficie (%)	201	61.98	16.52	0.047 (*)	0.000 (***)	0.000 (***)
Ortofosfatos	155	0.09	0.12	0.372 (ns)	0.000 (***)	0.000 (***)
pH de Campo	201	8.01	0.39	0.681 (ns)	0.000 (***)	0.000 (***)
Salinidad superficial	164	29.16	9.12	0.004 (**)	0.000 (****)	0.000 (***)
Sólidos suspendidos totales	160	53.03	26.75	0.000 (***)	0.235 (ns)	0.012 (*)
Temperatura del agua	201	29.77	1.92	0.190	0.000	0.000

NS = No significativo, \* = significativo \*\* = altamente significativo, \*\*\* = muy altamente significativo.

El tamaño de muestra se definió en base a la variable conductividad de campo, la cual mostró mayor variabilidad, con lo que aseguró que el tamaño de muestra sea representativo. La Figura 4 muestra el número de muestreos a considerar de acuerdo al nivel de confianza y margen de error permitido.



**Figura 4.** Desagregación de diferentes tamaños de muestra calculados a diferentes niveles de confianza y márgenes de error de estimación.

Después de analizar la disponibilidad de recursos financieros para realizar la toma y análisis de muestras, se determinó considerar coleccionar 70 muestras las cuales nos proporcionan elementos para realizar inferencias sobre las dos lagunas con nivel de confianza del 95% y un margen de error del 10%.

Al realizar el análisis a través de las diferentes condiciones de presencia de lluvias, se observó que existen diferencias significativas, lo que nos indica que es viable la toma de muestras en diferentes condiciones de temporal. Por lo anterior, se reagruparon los resultados en periodos que contemplan previo al temporal (enero-mayo), durante el temporal establecido (junio-septiembre), temporal medio (julio-agosto) y temporal final (octubre-diciembre). Se realizó un nuevo análisis de

varianza y se observó que es viable realizar la toma de muestras en los periodos previo al temporal (enero-mayo), durante el temporal establecido (junio-septiembre) y temporal final (octubre-diciembre) (Cuadro 5).

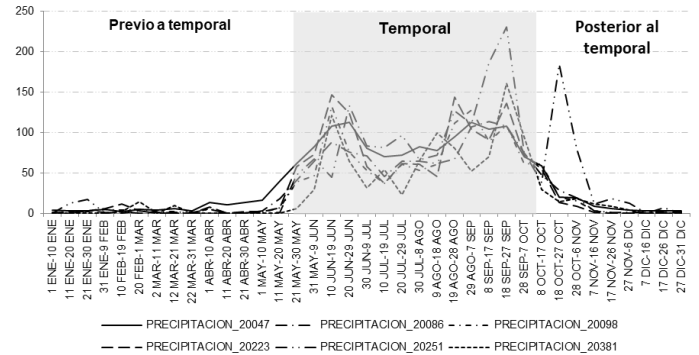
**Cuadro 5.** Resultados de análisis de varianza a través de las condiciones de temporal en los monitoreos realizados por la CONAGUA.

VARIABLES	PT-TE	TE-TM	TM-TF	Toma de muestras	Temporada
Absorción de rayos UV	0.0044 (**)	0.7049 (ns)	0.0376 (*)	4	PT-TE-TM-TF
Clorofila	0.9957 (ns)	0.9695 (ns)	0.0228 (*)	2	TM-TF
Color Verdadero	0.1648 (ns)	0.0496 (*)	0.0134 (**)	2	TM-TF
Conductividad de campo	0.1145 (ns)	0.0000 (***)	0.7078 (ns)	2	TE-TM
Carbono orgánico total	0.8895 (ns)	0.5355 (ns)	0.0069 (**)	2	TM-TF
Carbono orgánico soluble	0.0000 (***)	0.7890 (ns)	0.0000 (***)	4	PT-TE-TM-TF
Nitrogeno amoniacal	0.5893 (ns)	0.8288 (ns)	0.7081 (ns)	1	TF
Nitratos	0.9245 (ns)	0.1584 (ns)	0.1664 (ns)	1	TM
Nitrógeno orgánico	0.8624 (ns)	0.3589 (ns)	0.7468 (ns)	1	PT
Oxígeno disuelto en mg/l	0.9333 (ns)	0.0219 (*)	0.7270 (ns)	2	TE-TM
Oxígeno disuelto en la superficie (%)	0.2577 (ns)	0.1139 (ns)	0.9610 (ns)	1	TM
Ortofosfatos	0.2788 (ns)	0.8244 (ns)	0.9996 (ns)	1	PT
pH de Campo	0.1827 (ns)	0.0000 (***)	0.2298 (ns)	2	TE-TM
Salinidad superficial	0.0368 (*)	0.5647 (ns)	0.9961 (ns)	2	PT-TE
Sólidos suspendidos totales	0.9871 (ns)	0.6704 (ns)	0.8195 (ns)	1	TF
Temperatura del agua superficial	0.0415 (*)	0.0002 (***)	0.0716 (ns)	4	PT-TE-TM
Temperatura del ambiente	0.0856 (ns)	0.0013 (**)	0.4065 (ns)	2	TE-TM
Turbiedad del agua	0.9987 (ns)	0.9802 (ns)	0.4033 (ns)	1	PT
Temperatura del agua	0.0339 (*)	0.0003 (***)	0.0971 (ns)	4	PT-TE-TM

NS = No significativo, \* = significativo \*\* = altamente significativo, \*\*\* = muy altamente significativo.

Para establecer las fechas de muestreo se identificaron periodos previos al temporal (PT) entre los meses de

enero a mayo, durante el temporal establecido (TE) entre los meses de junio a septiembre y temporal final (TF) entre octubre a diciembre con el apoyo de pluviogramas (Figura 5), los cuales provienen del análisis climático de las estaciones listadas en el Cuadro 1.

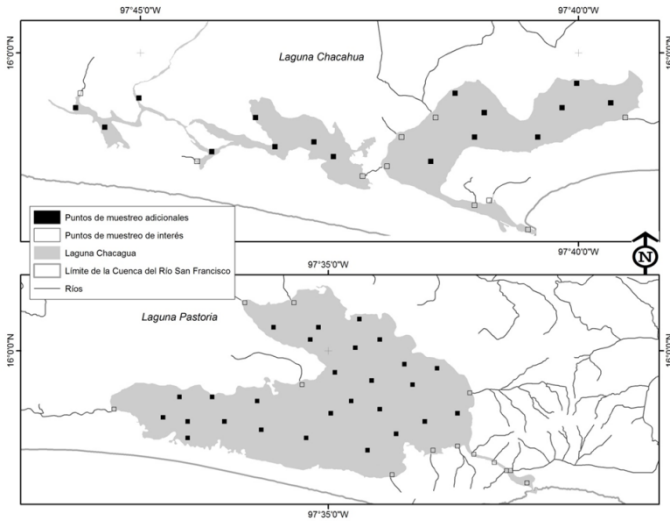


**Figura 5.** Distribución de muestreos a través del tiempo, de acuerdo a la distribución de la temporada de lluvias.

Con el análisis gráfico-visual y el análisis de varianza se propuso realizar dos mediciones: la primera antes de la temporada de lluvias, preferentemente antes de finalizar el mes de mayo y la segunda, a mediados de la temporada de lluvias, que puede ser entre los meses de junio y octubre.

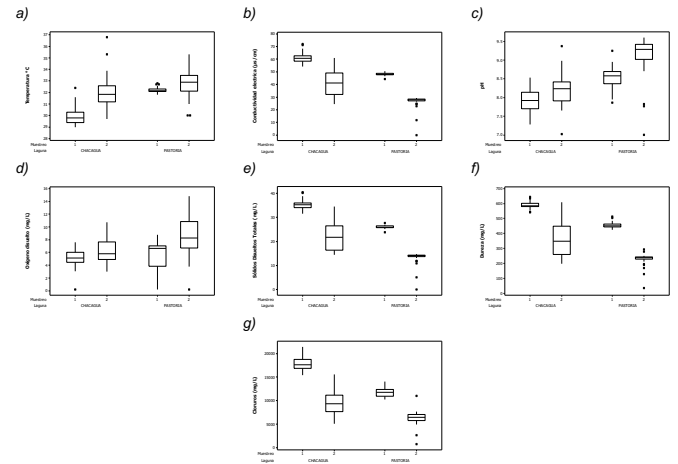
Una vez definido el esquema de muestreo a través del tiempo, se realizó la identificación de los sitios de muestreo, los cuales se encuentran distribuidos en desembocaduras de corrientes intermitentes, permanentes y en la zona eufótica con sus correspondientes

coordenadas geográficas y la distribución de los puntos de muestreo se distribuyen como se muestra en la Figura 6.



**Figura 6.** Distribución de puntos de muestreo para la toma de muestras de agua en las lagunas de Chacahua y Pastoría.

Para fines del presente trabajo, la descripción de resultados se enfoca en las variables que fueron empleadas para generar el *ICA* que son temperatura del agua, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, sólidos disueltos totales, dureza y cloruros. La Figura 7, se observa la variación de los indicadores en las lagunas para cada uno de los muestreos.



**Figura 7.** Gráficos de cajas y alambres de las variables empleadas para realizar el cálculo del *ICA*.

En las pruebas de normalidad, la variable temperatura del agua en la laguna de Chacahua no registra ajuste a la distribución normal en ambos muestreos ( $p=0.0050$  y  $p=0.0200$ , respectivamente); para la laguna de Pastoría los valores de  $p$  resultaron favorables para no rechazar la hipótesis de normalidad en los indicadores de temperatura del agua y oxígeno disuelto en el segundo muestreo con valores de  $p=0.4480$  y  $p=0.8630$ , respectivamente y para el indicador de cloruros en el primer muestreo ( $p=0.5540$ ) (Cuadro 6).

En lo referente a las comparaciones entre el primer y segundo muestreo, existe evidencia estadística para afirmar que no hay diferencia en los valores de pH en la laguna de Chacahua. Para el resto de los indicadores, en

ambas lagunas, existen diferencias significativas entre muestreos.

**Cuadro 6.** Desagregación de resultados de estadísticas descriptivas, pruebas de normalidad y prueba de diferencia de medias por muestreo para cada laguna.

Laguna	Variable	Variable codificada	Muestreo	N	Media	Devst.Est.	Prueba de normalidad*		Prueba	Prueba diferencia de medias**	
							Valor A-D	Valor p		Valor crítico	Valor p
Chacahua	Temperatura del agua	T_H2O	1	22	30.03	0.86	1.12	0.0050	Mann-Whitney	300.00	0.0000
			2	22	32.16	1.65	0.83	0.0200			
	pH	pH	1	22	7.92	0.35	0.29	0.5790	t-Student	-2.01	0.0580
			2	22	8.22	0.50	0.41	0.3180			
	Conductividad eléctrica	C_Elec_ms	1	22	51.39	4.55	0.72	0.0510	t-Student	8.54	0.0000
			2	22	42.05	10.80	0.29	0.5820			
	Sólidos disueltos	SDT	1	22	35.40	2.29	0.60	0.1030	t-Student	9.54	0.0000
			2	22	22.48	6.41	0.50	0.1830			
	Oxígeno disuelto	O_Dis	1	22	5.15	1.79	0.54	0.1470	t-Student	-1.38	0.0030
			2	22	6.6100	1.97	0.35	0.4470			
	Sodio	Na	1	22	10.5110	2.1150	4.09	0.0050	Mann-Whitney	720.00	0.0000
			2	22	6.6100	1.7080	0.58	0.1160			
	Calcio	Ca	1	22	395.21	21.17	0.29	0.5700	Mann-Whitney	620.00	0.0030
			2	22	292.20	111.80	0.75	0.0430			
	Magnesio	Mg	1	22	1,194.00	54.90	0.34	0.4780	t-Student	9.02	0.0000
			2	22	714.20	250.80	0.49	0.1960			
	Hierro	Fe	1	22	0.83	0.47	1.50	0.0050	Mann-Whitney	609.00	0.0077
			2	22	0.71	0.84	3.46	0.0050			
	Potasio	K	1	22	402.82	27.97	0.46	0.2340	t-Student	10.33	0.0000
			2	22	246.60	70.60	0.70	0.0590			
	Carbonatos	Carbonatos	1	22	11.35	4.86	0.58	0.1190	Mann-Whitney	573.50	0.0671
			2	22	9.06	3.77	1.42	0.0050			
	Bicarbonatos	Bicarbonatos	1	22	131.28	9.54	0.43	0.2850	t-Student	-0.56	0.5790
			2	22	134.01	26.06	2.98	0.0050			
Sulfatos	Sulfatos	1	22	2,124.20	153.70	0.61	0.1000	t-Student	7.35	0.0000	
		2	22	1,410.60	453.80	0.56	0.1300				
Cloruros	Cloruros	1	22	17,818.00	1,403.00	0.17	0.9200	t-Student	12.67	0.0000	
		2	22	9,546.00	2,671.00	0.41	0.3220				
Pastoría	Temperatura del agua	T_H2O	1	40	32.23	0.23	1.12	0.0050	Mann-Whitney	2420.00	0.0000
			2	40	32.85	1.19	0.35	0.4480			
	pH	pH	1	40	8.54	0.27	1.04	0.0090	Mann-Whitney	972.00	0.0000
			2	40	9.11	0.52	3.80	0.0005			
	Conductividad eléctrica	C_Elec_ms	1	40	48.16	1.13	8.45	0.0050	Mann-Whitney	2420.00	0.0000
			2	40	26.54	5.14	1.12	0.0005			
	Sólidos disueltos	SDT	1	40	25.99	0.66	1.20	0.0050	Mann-Whitney	2420.00	0.0000
			2	40	13.31	2.68	8.41	0.0050			
	Oxígeno disuelto	O_Dis	1	40	5.65	2.02	2.69	0.0050	Mann-Whitney	1135.50	0.0000
			2	40	8.36	2.93	0.21	0.8630			
	Sodio	Na	1	40	7,338.40	492.20	2.39	0.0050	Mann-Whitney	2420.00	0.0000
			2	40	3,932.00	758.00	5.54	0.0050			
	Calcio	Ca	1	40	283.03	25.04	2.11	0.0050	Mann-Whitney	2420.00	0.0000
			2	40	133.57	21.11	1.77	0.0050			
	Magnesio	Mg	1	40	936.72	34.30	1.50	0.0050	Mann-Whitney	2420.00	0.0000
			2	40	473.80	91.40	5.62	0.0050			
	Hierro	Fe	1	40	0.31	0.26	4.72	0.0050	Mann-Whitney	1601.00	0.8587
			2	40	0.23	0.08	14.98	0.0050			
	Potasio	K	1	40	284.97	13.78	0.73	0.0520	Mann-Whitney	2420.00	0.0000
			2	40	136.31	25.90	6.23	0.0050			
	Carbonatos	Carbonatos	1	40	9.66	3.31	0.35	0.4530	Mann-Whitney	1713.00	0.3734
			2	40	8.30	6.53	1.10	0.0050			
	Bicarbonatos	Bicarbonatos	1	40	161.90	21.11	5.87	0.0050	Mann-Whitney	2367.00	0.0000
			2	40	123.80	15.98	0.59	0.1180			
Sulfatos	Sulfatos	1	40	1,500.40	202.40	8.28	0.0050	Mann-Whitney	1796.00	0.0913	
		2	40	1,808.00	1,351.00	4.92	0.0050				
Cloruros	Cloruros	1	40	11,765.00	909.00	0.31	0.5540	Mann-Whitney	2409.00	0.0000	
		2	40	6,288.00	1,477.00	2.24	0.0050				

\* Valor de p < alfa = 0.05 no existe evidencia estadística de que los datos se ajusten a la distribución normal.

\*\* Valor de p < alfa = 0.05 no existe evidencia estadística de que los indicadores sean iguales en ambos muestreos.

En lo que respecta a la comparación entre lagunas, se observó que en el primer muestreo no se registraron diferencias significativas en la concentración de oxígeno disuelto (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Desagregación de resultados de estadísticas descriptivas, pruebas de normalidad y prueba de diferencia de medias por laguna.

Variable	Variable codificada	Laguna	Muestreo	N	Media	Devst.Est.	Prueba de normalidad*		Prueba	Prueba diferencia de medias**						
							Valor A-D	Valor p		Valor crítico	Valor p					
Temperatura del agua	T_H2O	Chacahua	1	22	30.03	0.86	1.12	0.0050	Mann-Whitney	285.00	0.0000					
			2	22	32.16	1.65	0.83	0.0200								
		Pastoría	1	40	32.23	0.23	1.12	0.0050								
			2	40	32.85	1.19	0.35	0.4480								
		pH	pH	Chacahua	1	22	7.92	0.35				0.29	0.5790	Mann-Whitney	318.00	0.0000
					2	22	8.22	0.50				0.41	0.3180			
Pastoría	1			40	8.54	0.27	1.04	0.0090								
	2			40	9.11	0.52	3.80	0.0005								
Conductividad eléctrica	C_Elec_ms			Chacahua	1	22	51.39	4.55	0.72	0.0510	Mann-Whitney	1133.00	0.0000			
					2	22	42.05	10.80	0.29	0.5820						
		Pastoría	1	40	25.99	0.66	1.20	0.0050								
			2	40	13.31	2.68	8.41	0.0050								
		Sólidos disueltos totales	SDT	Chacahua	1	22	35.40	2.29	0.60	0.1030				Mann-Whitney	1126.00	0.0000
					2	22	22.48	6.41	0.50	0.1830						
Pastoría	1			40	25.99	0.66	1.20	0.0050								
	2			40	13.31	2.68	8.41	0.0050								
Oxígeno disuelto	O_Dis			Chacahua	1	22	5.15	1.79	0.54	0.1470	Mann-Whitney	613.00	0.2422			
					2	22	6.21	1.97	0.35	0.4470						
		Pastoría	1	40	5.65	2.02	2.69	0.0050								
			2	40	8.36	2.93	0.21	0.8630								
		Sodio	Na	Chacahua	1	22	10.5110	2.1150	4.09	0.0050				Mann-Whitney	1126.00	0.0000
					2	22	6.6100	1.7080	0.58	0.1160						
Pastoría	1			40	7,338.40	492.20	2.39	0.0050								
	2			40	3,932.00	758.00	5.54	0.0050								
Calcio	Ca			Chacahua	1	22	395.21	21.17	0.29	0.5700	Mann-Whitney	1131.00	0.0000			
					2	22	292.20	111.80	0.75	0.0430						
		Pastoría	1	40	283.03	25.04	2.11	0.0050								
			2	40	133.57	21.11	1.77	0.0050								
		Magnesio	Mg	Chacahua	1	22	1,194.00	54.90	0.34	0.4780				Mann-Whitney	1133.00	0.0000
					2	22	714.20	250.80	0.49	0.1960						
Pastoría	1			40	936.72	34.30	1.50	0.0050								
	2			40	473.80	91.40	5.62	0.0050								
Hierro	Fe			Chacahua	1	22	0.83	0.47	1.50	0.0050	Mann-Whitney	1042.00	0.0000			
					2	22	0.71	0.84	3.46	0.0050						
		Pastoría	1	40	0.31	0.26	4.72	0.0050								
			2	40	0.23	0.08	14.98	0.0050								
		Potasio	K	Chacahua	1	22	402.82	27.97	0.46	0.2340				t-Student	18.56	0.0000
					2	22	246.60	70.60	0.70	0.0590						
Pastoría	1			40	284.97	13.78	0.73	0.0520								
	2			40	136.31	25.90	6.23	0.0050								
Carbonatos	Carbonatos			Chacahua	1	22	11.35	4.86	0.58	0.1190	t-Student	1.46	0.1540			
					2	22	9.06	3.77	1.42	0.0050						
		Pastoría	1	40	9.66	3.31	0.35	0.4530								
			2	40	8.30	6.53	1.10	0.0050								
		Bicarbonatos	Bicarbonatos	Chacahua	1	22	131.28	9.54	0.43	0.2850				Mann-Whitney	697.00	0.9589
					2	22	134.01	26.06	2.98	0.0050						
Pastoría	1			40	161.90	21.11	5.87	0.0050								
	2			40	123.80	15.98	0.59	0.1180								
Sulfatos	Sulfatos			Chacahua	1	22	2,124.20	153.70	0.61	0.1000	Mann-Whitney	1133.00	0.0000			
					2	22	1,410.60	453.80	0.56	0.1300						
		Pastoría	1	40	1,500.40	202.40	8.28	0.0050								
			2	40	1,808.00	1,351.00	4.92	0.0050								
		Cloruros	Cloruros	Chacahua	1	22	11,765.00	909.00	0.31	0.5540				t-Student	18.24	0.0000
					2	22	9,546.00	2,671.00	0.41	0.3220						
Pastoría	1			40	11,765.00	909.00	0.31	0.5540								
	2			40	6,288.00	1,477.00	2.24	0.0050								

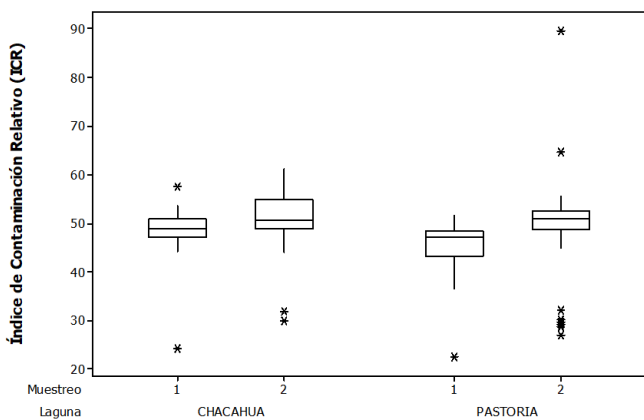
\* Valor de p < alfa = 0.05 no existe evidencia estadística de que los datos se ajusten a la distribución normal.

\*\* Valor de p < alfa = 0.05 no existe evidencia estadística de que las concentraciones sean iguales en ambas lagunas.

Finalmente, en lo referente a los valores del ICA se observó que para el primer muestreo varió de 45.50 a 50.88 en la laguna de Chacahua y de 43.86 a 47.15 en la laguna de Pastoría; en tanto que, para el segundo muestreo, los niveles de calidad de agua oscilaron entre 47.18 y 53.87 en la laguna de Chacahua y de 45.16 a 52.33 en Pastoría. Dichos intervalos indican que la calidad del

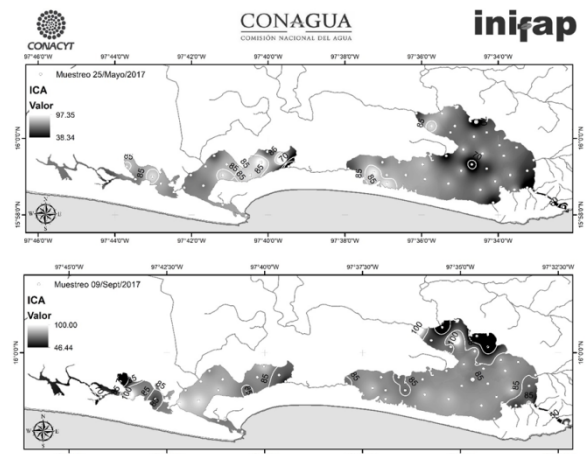
agua, en términos generales, en Chacahua es poco contaminado y puede considerarse que para la vida acuática el agua de esta laguna es aceptable, excepto para especies muy sensibles a la falta de oxígeno y niveles de pH. En contraste, Pastoría registra valores de ICA en términos generales, se considera como contaminada y que dicha calidad es cuestionable para especies muy sensibles a los niveles bajos de oxígeno y aguas muy ácidas o muy alcalinas.

lagunas con excepción de algunos puntos. Estas diferencias pueden ser atribuidas a que en Pastoría la contaminación puede deberse a factores antropogénicos como escurrimientos domésticos provenientes de los asentamientos humanos cerca del complejo lagunar, al escurrimiento de elementos químicos empleados en campos agrícolas o a factores que pueden presentarse al interior de las lagunas, como el estancamiento de agua provocado por el taponamiento de su bocanilla que conecta al mar, lo que limita la circulación a través del incremento y disminución de las mareas, ya que la unión que cuenta con la laguna de Chacahua por medio del canal El Corral no es suficiente para permitir el movimiento al interior de Pastoría.



**Figura 8.** Gráficos de cajas y alambres para el valor del ICA para cada laguna por muestreo.

En cuanto a la variación espacial del ICA en ambas lagunas, en la Figura 9 se observa que previo a la temporada de lluvias (primer muestreo), el agua de las lagunas tiene un índice de calidad promedio menor que el que se presenta en la temporada de lluvias (segundo muestreo) y este comportamiento se observa para ambas



**Figura 9.** Distribución y variación del ICA en las lagunas de Chacahua y Pastoría para cada uno de los muestreos realizados.

## **CONCLUSIONES**

Un aspecto importante que se observó en este estudio, es que los comportamientos de los elementos considerados para el cálculo del *ICA* tienen variación dinámica en espacio y tiempo debido a que en el sistema lagunar pueden influir condiciones climáticas como fisiográficas y de mareas que ingresan por la bocanera de Chacahua, los cuales se deberán probar con un estudio que considere estos factores.

En base al cálculo del *ICA*, puede considerarse que el agua de ambas lagunas puede ser propicio para la vida acuática y pesca de especies que tienen cierta tolerancia a este tipo de aguas tales como camarón, trucha, carpa, bagre, entre otros (DOF, 2011). Así mismo, el uso recreativo puede ser aceptable, más no recomendable siempre y cuando el índice de calidad no disminuya. Es importante destacar que una de las ventajas con las que cuenta el complejo lagunar Chacahua-Pastoría es la presencia del manglar cuyos beneficios se ven reflejados como filtros biológicos y albergan una gran variedad de fauna acuática que son fuente de subsistencia para los habitantes de la zona.

Adicionalmente, fue posible aplicar una ecuación para calcular el *ICA* para el complejo lagunar, en donde el índice de calidad del agua resultó ligeramente mayor en la temporada de lluvias, por lo que es ampliamente necesario considerar un estudio posterior en donde se aborde la influencia de las corrientes de los ríos que desembocan en dichas lagunas, así como realizar simulaciones en donde se muestre los posibles escenarios que puedan presentarse en casos extremos, tales como el taponamiento de la bocanera de Chacahua o la remoción del banco de arena que se encuentra en la bocanera de la laguna de Pastoría.

## **AGRADECIMIENTO**

Al Fondo Sectorial CONACYT-CONAGUA por el financiamiento que dio origen al presente trabajo mediante el desarrollo del proyecto 266193 “*Caracterización Biofísica y Estudio Hidrodinámico y Transporte de Sedimentos a nivel de cuenca del Complejo Lagunar Chacahua-Pastoría, Oaxaca*”.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Anderson, T. W., & Darling, D. A. (1954). A test a goodness of fit. *Journal of the American Statistical Association*, 49, 765-769.



- Arriaga, L.; Aguilar, V. Aguilar y Alcocer, J. (2002). RHP Río Verde-Laguna de Chacahua. In: Arriaga, L.; Aguirar, V. y Alcocer, J. 2002. "Aguas continentales y diversidad biológica de México". Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Brown, R., & McClelland, N. (1973). Water quality index. Application in the Kansas river basin. Cleveland, Ohio.
- Calvo B., G., & Mora M., J. (2012). Análisis de la calidad de varios cuerpos de agua superficiales en el GAM y la Península de Osa utilizando el Índice Holandés. *Tecnología en Marcha*, 25(5), 37-44.
- CONABIO-CONANP-TNC-Pronatura. (2007). Sistema Lagunar Chacahua-Pastoría. CONABIO-CONANP-TNCPronatura. 2007. Vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad marina de México: océanos, costas e islas. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. The Nature Conservancy-Programa México, Pronatura. México.
- Conan, P., Pujó-Pay, M., Agab, M., Calva-Benitez, L., Chifflet, S., Douillet, P., . . . Ghiglione, J. F. (2017). Biogeochemical cycling and phyto and bacterioplankton communities in a large and shallow tropical lagoon under 2009-2010 El niño modoki drought conditions. *Biogeosciences*, 14, 959-975.
- Díaz P., G., Sánchez C., I., Quiróz, R., Garatuza P., J., Watts T., C., & Cruz M., I. R. (2008). Interpolación espacial de la precipitación pluvial en la zona de barlovento y sotavento del golfo de México. *Agricultura técnica en México*, 34(3), 279-287.
- Dinius, S. H. (1987). Desing of a water quality index. *W.R. Bulletin.*, 23(5), 833-843.
- Gábor H., I., Magyar, N., Zessner, M., Kovács, J., & Blaschke, A. P. (2014). The water framework directive: Can more information be extracted from grounwater data? A case study of Seewinkel, Burgenland eastern Austria. *Hydrogeology Journal* (22), 779-794.

- Gazzaz, N., Yussof, M., Aris, A., Juahir, H., & Ramli, M. (2012). Artificial neural network modeling of the water quality index for Kinta River (Malaysia) using water quality variables as predictors. *Marine Pollution Bulletin*, 64(11), 2409-2420.
- Giraldo H., R. (2011). *Estadística Espacial*. (U. N. Colombia, Ed.) Bogotá, Bogotá, Colombia.
- Griffith, D. A. (2013). Establishing Qualitative Geographic Sample Size in the Presence of Spatial Autocorrelation. *Annals Of The Association Of American Geographers*, 103(5), 1107-1122.
- Handcock, M. S. (2007). Model-based combination of spatial information for stream networks. *Environmental & Ecological Statistics*, 14(3), 267-284.
- Landwehr, J., & Denninger, R. (1976). Comparison of several water quality indices. *Water Pollution Control Federal.*, 48(5), 954-958.
- León V., L. F. (1991). *Índices de Calidad del Agua (ICA), Forma de Estimarlos y Aplicación en la Cuenca Lerma-Chapala*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua., 7.
- Li, W., Zhang, C., Dey, D., & Wang, S. (2010). Estimating threshold-exceeding probability maps of environmental variables with Markov chain random fields. *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 24(8), 1113-1126.
- Luna P., V., Alva M., A., & Bernal B., A. (2004). Cuerpos de agua superficiales. En D. G. Posgrados (Ed.), *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales* (págs. 117-143). México, México: UNAM.
- Machado A., A., & Castillo, M. (2009). La importancia de las lagunas costeras. *Acta Biológica Venezuelica*, 29, 1-2.
- Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other. *Annals of Mathematical Statistics.*, 18(1), 50-60.
- Martínez T., E. (2016). *Variación espacio-temporal de la calidad del agua del Río Atoyac (2013-2014)*, Puebla, México.
- Momou, K., Akoua-Koffi, C., Traoré, K., Akré, D., & Dosso, M. (2017). Effects of rainfalls variability and physical-chemical parameters on enteroviruses in sewage and lagoon in Yopougon,

- Côte d'Ivoire. *Applied Water Science*, 7(4), 2075-2087.
- Moschino, V., Delaney, E., Meneghetti, F., & Da Ros, L. (2011). Biomonitoring approach with mussel *Mytilus galloprovincialis* (Lmk) and clam *Ruditapes philippinarum* (Adams and Reeve, 1850) in the Lagoon of Venice. *Environ Monit Assess* (177), 649-663.
- Nkwoji, J. A. (2017). The Impacts of Organic Pollution on the Hydrochemistry and Community Structure of Benthic Macrofauna of Lagos Lagoon, Southwest Nigeria. *J. Appl. Sci. Environ. Manage.*, 21(2), 225-233.
- Odum, E. P. (1998). *Ecología: El vínculo entre las Ciencias Naturales y las Sociales*. México, D.F., México: University of Chicago.
- Pérez, H., Shumilin, E., & Rodríguez, G. (2015). Trace elements in the marine sediments of the La Paz Lagoon, Baja California Peninsula, Mexico: Pollution Status in 2013. *Bull Environ Contam Toxicol*, 95, 61-66.
- Philip, G. M., & Watson, D. F. (1982). *A Precise Method for Determining Contoured Surfaces*. Australian Petroleum Exploration Association Journal., 22, 205-212.
- Pimienta L., R. (1999). Esquemas de muestreo y márgenes de confiabilidad en encuestas de opinión política. *Sociología*, 14(39), 183-202.
- QGIS Development Team. (2019). *QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. <https://qgis.org>.
- R Core Team. (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>.
- Ryding, S. O., & Rast, W. (1989). *The control of eutrophication of lakes and reservoirs*. Man and the biosphere. Paris and London: UNESCO and Parthenon.
- Salinas Ordaz, D., & Jiménez Fernández, E. J. (2008). *Ficha informativa de los Humedales de Ramsar (FIR)-Versión 2006-2008*. Puerto Escondido, Mixtepec Juquila, Oaxaca: RAMSAR.
- Scheaffer, R. L., Mendenhall, W., & Ott, L. (2007). *Elementos de Muestreo (Sexta edición ed.)*. (P. S.A., Ed.) Madrid, Madrid, España: Thomson Editores.

Student. (1908). The probable error of a mean.

Biometrika, 6, 1-25.

Suess, M. J. (1982). Examination of water for pollution

control. (Vol. 1). Londres, Londres, Inglaterra:

Who/E y Pergamon Press.

USGS. (2017). La Ciencia del Agua. Recuperado el 19

de Enero de 2018, de

<https://water.usgs.gov/gotita/waterquality.html>