



III CONGRESO NACIONAL DE RIEGO Y DRENAJE COMEII 2017

Puebla, Pue., del 28 al 30 de noviembre de 2017

ESQUEMA DE MUESTREO PARA ESTUDIAR LA CALIDAD DE AGUAS EN EL COMPLEJO LAGUNAR CHACAHUA-PASTORÍA, OAXACA

**Rafael Alberto Guajardo Panes^{1*}; Gabriel Díaz Padilla¹; Finlandia Barbosa Moreno²;
José Antonio Cueto Wong³; Ignacio Sánchez Cohen³**

¹INIFAP.C.E. Cotaxtla. Km. 3.5 Carr. Xalapa-Veracruz, C.P. 91190, Xalapa, Veracruz; México.

guajardo.rafael@inifap.gob.mx – telf.: 01 800 088 2222 ext. 87840 (*Autor de correspondencia)

²INIFAP. C.E. Valles Centrales. Melchor Ocampo No. 7, Santo Domingo Barrio Bajo, Villa de Etla, Oaxaca, C.P. 68200. México.

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

Resumen

La estadística espacial permite identificar la ubicación de indicadores con la finalidad de deducir su comportamiento en un espacio geográfico de interés. El presente trabajo tiene como objetivo presentar un proceso metodológico para determinar el número mínimo de muestras de agua y puntos específicos donde se realice la toma de éstas en el complejo lagunar Chacahua-Pastoría del estado de Oaxaca. Con el uso de información previa colectada por la CONAGUA sobre calidad de agua en el complejo lagunar, se identificó que la variable de conductividad fue de utilidad para estimar un tamaño de muestra bajo un esquema aleatorio simple con los niveles de confianza del 80, 85, 90, 95 y 99% para diferentes márgenes de error de estimación (5, 10, 15 y 20%). Mediante análisis de varianza a las muestras tomadas en fechas anteriores, se identificaron diferencias significativas a través del tiempo, y junto con un análisis de la climatología histórica de seis estaciones se definieron los periodos en los que fueron colectados: previo al temporal (finales de mayo), temporal intermedio (agosto-septiembre), y final de temporal (septiembre-octubre). Finalmente, mediante el apoyo de SIG, se definieron puntos de muestreo de interés en zonas de desembocaduras de afluentes y puntos adicionales distribuidos uniformemente en cada una de las lagunas que conforman el complejo lagunar Chacahua-Pastoría. En trabajos posteriores, esta propuesta metodológica permitirá realizar el modelado de la estructura y correlación espacial de las variables que fueron medidas tanto en campo como en el laboratorio.

Palabras clave adicionales: estadística espacial, sistemas de información geográfica, tamaño de muestra, espacio, tiempo.



Introducción

El agua es un elemento indispensable para la vida en el planeta (Luna, *et al.*, 2004) y su protección es uno de los objetivos más importantes (Gábor, *et al.*, 2014). Debido a las diversas actividades humanas, el ciclo biogeoquímico del agua, se ha visto afectado significativamente (Odum, 1998), no sólo por el volumen utilizado, sino también por el grado de contaminación con que son retornadas a los cuerpos receptores como ríos y lagos, entre otros (Ryding & Rast, 1989; Suess, 1982).

La necesidad de acudir a herramientas estadísticas para el análisis de datos en todas las áreas del conocimiento, ha hecho que aparezcan con el correr de los años nuevas metodologías que, no obstante se centran en fundamentos probabilísticos comunes y son específicas para cada una de las diversas disciplinas del saber (Giraldo, 2011). Las mejoras evolutivas en los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ahora permiten rutinariamente la gestión y el mapeo de la información espacio-temporal. En respuesta, el desarrollo de modelos estadísticos para combinar información de diferentes tipos y apoyo espacial es de vital importancia para la ciencia ambiental (Handcock, 2007). La estimación y el mapeo de la incertidumbre espacial de variables ambientales, es crucial para la evaluación ambiental y la toma de decisiones. Para una variable espacial continua, la estimación de la incertidumbre espacial puede realizarse en forma para estimar la probabilidad de superar o no un valor umbral (Li, *et al.*, 2010).

El tamaño de muestra es un factor crucial en cualquier tipo de proyecto que implique la toma de características de una colección de elementos acerca de los cuales deseamos hacer alguna inferencia, y asegura el número mínimo de observaciones que garantizan la representatividad de una población. Si el tamaño de muestra es inadecuado, puede inducir a la obtención de resultados de investigación erróneos y con ello se habrán desaprovechado recursos valiosos en una investigación. Griffith (2013), menciona que en estudios cuantitativos, especialistas que estudian los impactos de la autocorrelación espacial, han enfrentado la problemática de la determinación del tamaño de muestra y que al momento se sabe poco sobre los impactos que tiene la autocorrelación espacial sobre una investigación geográfica en donde esta es necesaria, frecuentemente, para entender las tendencias y patrones en el manejo de recursos naturales debido a limitaciones financieras y de tiempo.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una propuesta metodológica para determinar el tamaño muestra y distribución de unidades de muestreo en el complejo lagunar Chacahua-Pastoría, considerando las dimensiones de espacio y tiempo, es decir, donde y cuando muestrear con la finalidad de que los resultados puedan ser analizados mediante procesos geoestadísticos.



Materiales y métodos

Ubicación de la zona de estudio

El sitio se localiza en la franja costera del municipio de Villa de Tututepec de Melchor Ocampo, en el distrito de Juquila, región Costa del Estado de Oaxaca, sureste de la República Mexicana. El complejo lagunar Chacahua-Pastoria, es un área natural protegida del estado de Oaxaca que se localiza entre los 15°59'11" y los 16°00'59" de latitud norte y 97°31'38" y los 97°47'23" de longitud oeste y tiene una extensión aproximada de 17 424 ha, de las cuales aproximadamente 3 479 ha corresponden a cuerpos de agua y 13 945 ha a tierra firme. El complejo lagunar forma parte del Parque Nacional Lagunas de Chacahua, que se encuentra ubicado dentro de la Cuenca Hidrológica RH-21, dentro de la cuenca del Río Colotepec y subcuenca San Francisco, con una superficie aproximada a los 660 km². Sus límites se encuentran al oeste con el Río Verde, al este, con la subcuenca del Río Grande y al sur con el Océano Pacífico. El complejo lagunar cuenta con las vertientes del Río San Francisco, Chacalapa y algunos arroyos temporales (Salinas y Jiménez, 2008).

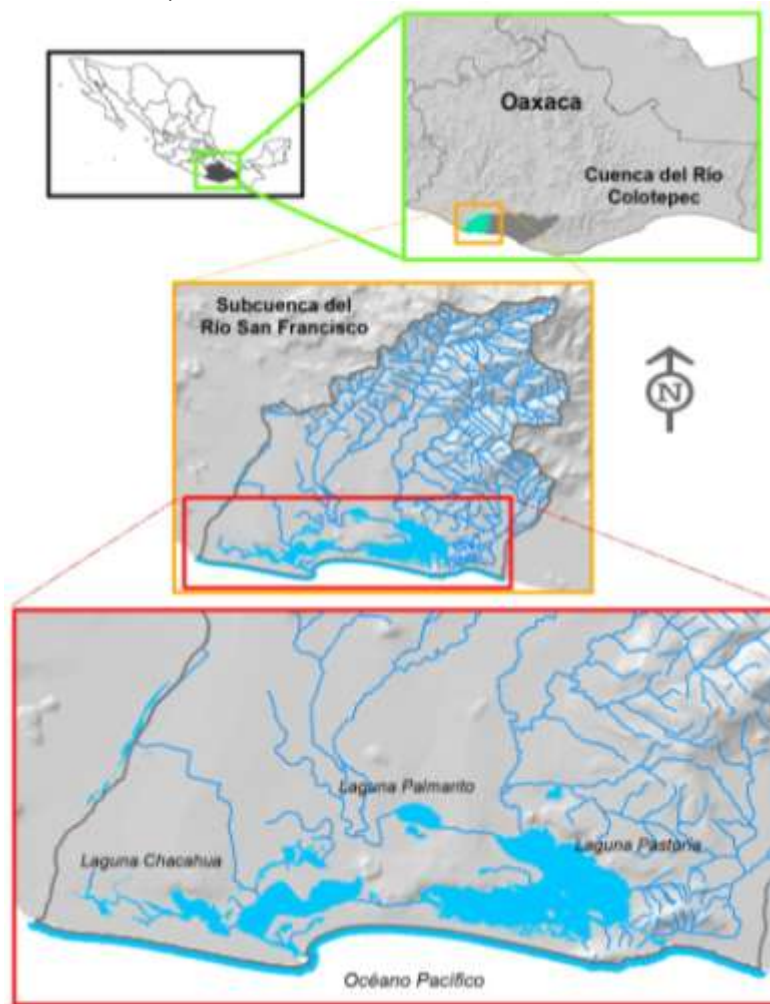


Figura 1.Ubicación del complejo lagunar Chacahua-Pastoria.



La naturaleza de este Sistema Lagunar ha permitido, el desarrollo de múltiples actividades que realiza la población en la cuenca y la presencia de fenómenos meteorológicos extremos. En este escenario con el tiempo se ha originado el azolvamiento de una de las bocas de comunicación entre lagunas, de forma específica la que corresponde a Cerro Hermoso, lo que evita la circulación natural entre agua continental y marina en las lagunas de Chacahua y Pastoría, provocado el deterioro del humedal. Ante esta problemática, es necesario realizar un estudio geográfico donde se muestre el estado actual del humedal para proponer un plan de manejo integral en la cuenca.

Con el fin de contemplar como área de estudio el complejo lagunar, se identificó la ubicación de las lagunas de Chacahua, Palmarito y Pastoría en la Subcuenca del Río San Francisco. Subsecuentemente, se realizó la delimitación de cuadrantes de trabajo con una extensión aproximada de 900 ha para subdividirlas en cuadrantes de una hectárea, siendo esta la unidad mínima de observación. Una vez que se contó con la cuadrícula de trabajo, se procedió a realizar la ubicación de los puntos donde la CONAGUA, registró sus puntos de muestreo en el estudio realizado previamente en el periodo 2012-2016. Cada uno de estos puntos fueron sobrepuestos en una malla de una hectárea con el fin de identificar en que celdas incidieron; además, cada muestra se consideró como parte de un muestreo piloto.

Tamaño de muestra

Con el objeto de determinar el número de puntos de muestreo para tomar las muestras de agua se realizó una segmentación de las tres lagunas que conforman el complejo lagunar en celdas de una hectáreas, definiendo a cada una de ellas como la unidad mínima de observación, es decir, los elementos de muestreo a los cuales les serán medidas un conjunto de variables y cada uno de estos elementos tienen la misma probabilidad de ser seleccionadas para conformar el marco de muestreo.

El método para realizar el cálculo de tamaño de muestra es el Muestreo Aleatorio Simple (MAS), el cual se define como:

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

Donde:

$$D = \frac{B^2}{4} \quad (2)$$

y B se estima mediante:

$$B = 2\sqrt{V(\bar{y})} = 2\sqrt{\frac{\sigma^2}{n} \left(\frac{N-n}{N-1} \right)} \quad (3)$$



En donde el valor de σ^2 y n se obtiene de un estudio previo que realizó la CONAGUA (2012-2016) sobre calidad de agua en el mismo complejo lagunar.

Temporalidad de toma de muestras

Dado que fue de interés observar el comportamiento de los indicadores a través del tiempo, fue necesario realizar un análisis de varianza a los datos de calidad de agua, tomando como hipótesis nula que el comportamiento de los indicadores son iguales a través del tiempo en que se tomó registro de la información y a partir de esta hipótesis fue posible establecer si los registros de la toma de muestras de agua tendrían que realizarse en uno o más periodos de tiempo.

Definición de periodos de observación

Con el análisis exploratorio de datos climáticos y por medio de climogramas de precipitación, se observó que es necesario realizar la toma de muestras en tres periodos de tiempo ya que se tiene la hipótesis que la composición de elementos en el complejo lagunar tiene una estrecha relación con las actividades que se desarrollan en las zonas que abastecen de agua al complejo en estudio.

Para definir los periodos de tiempo en los que las muestras deberán ser tomadas se asignaron a cada mes del año diferentes periodos de observación asociados a la temporada de lluvias, estos fueron previo al temporal (enero-mayo), temporal establecido (junio-julio), temporal medio (agosto-septiembre) y final de temporal (septiembre-octubre).

Tipos de muestreo

Dada la importancia que implica contar con información tanto de los cuerpos de agua como de las vertientes que abastecen a estos, fue necesario realizar una clasificación de tipos de muestreo y establecer los puntos en que deberán recolectarse las muestras de agua en las lagunas de Chacahua, Pastoria y Palmarito (Muestreos de Tipo I) y en puntos de libre elección en las corrientes de agua de los ríos San Francisco y Chacalapa (Muestreos de Tipo II).

Desagregación de muestras

La desagregación de muestras de Tipo I se realizó en dos modalidades, la primera consistió en seleccionar aquellos cuadrantes donde se encontraban desembocaduras de corrientes de agua a la laguna; la segunda consistió en realizar una distribución aleatoria de los puntos de muestreo en el interior de las lagunas.



Análisis y discusión de resultados

Unidades de muestreo

Los cuerpos de agua que comprenden el complejo lagunar Chacahua-Pastoria, fueron segmentadas (figura 2) en un total de 3 777 cuadrantes de una hectárea, desagregadas en 172 para la laguna de Palmarito, 2 366 para Pastoria y 1 239 para Chacahua.



Figura 2. Segmentación de los cuerpos de agua en el complejo lagunar Chacahua-Pastoria.

Tamaños de muestra a considerar a diferentes niveles de confianza y márgenes de error de estimación

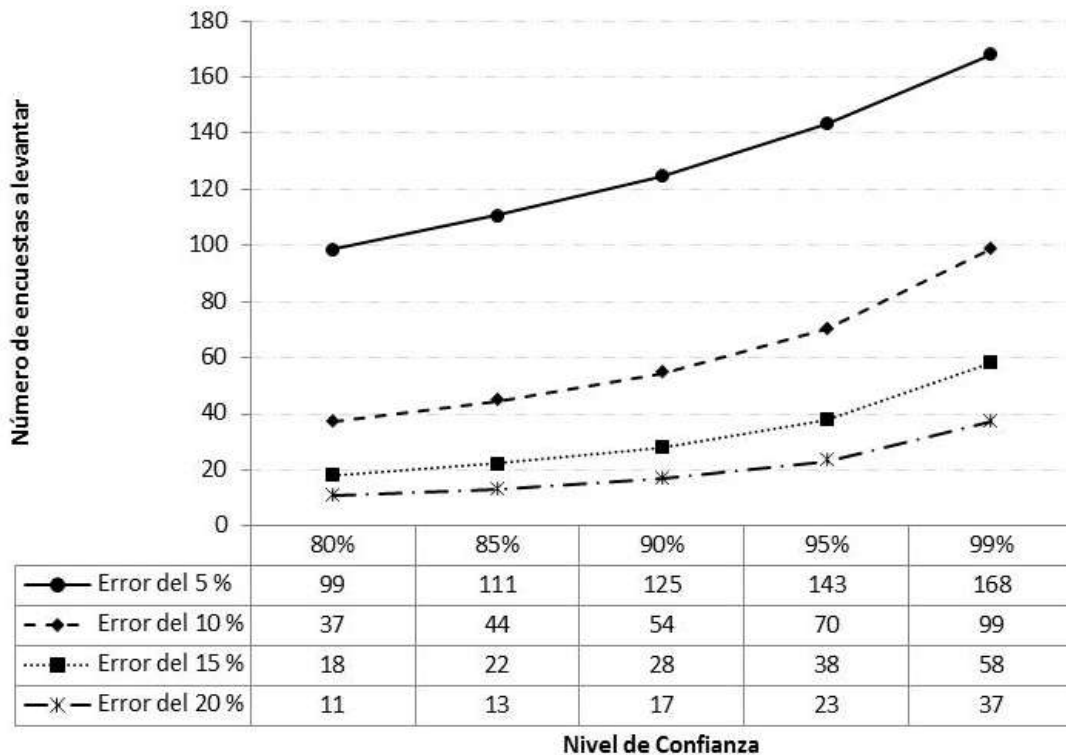


Figura 3. Desagregación de diferentes tamaños de muestra calculados a diferentes niveles de confianza y márgenes de error de estimación.



Tamaño de muestra

El tamaño de muestra quedó definido en base a la variable conductividad de campo, la cual mostró contar con la mayor variabilidad, por lo cual se consideró que sería la variable idónea para calcular el tamaño de muestra más representativo. A partir de la información representada en la Figura 3, se determinó que se contaba con recursos suficientes para considerar un tamaño de muestra con un nivel de confianza del 95% y con un margen de error de estimación del 10%, es decir, se consideró tomar las muestras de agua en 70 puntos identificables del complejo lagunar, los cuales se distribuyeron en diferentes periodos de tiempo definidos en el párrafo siguiente.

Esquema de muestreo a través del tiempo

Por medio del análisis de varianza de las variables tomadas en la muestra piloto realizado por la CONAGUA, los resultados mostraron diferencias significativas a través de los meses (Cuadro 1).

Cuadro 1. Resultados de análisis de varianza a través de los meses.

VARIABLES	MUESTRAS PILOTO	MEDIA	DESV_STD	DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS EN ANOVA		
				SITIO	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
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
Carbono orgánico soluble	191	6.31	5.17	0.000	0.000	0.019
Nitrogeno amoniacal	168	0.16	0.25	0.295	0.128	0.435
Nitratos	168	0.22	0.22	0.815	0.000	0.000
Nitrógeno orgánico	165	0.54	1.84	0.918	0.707	0.409
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	0.000	0.000
pH de Campo	201	8.01	0.39	0.681	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	0.012
Temperatura del agua superficial	201	29.77	1.92	0.190	0.000	0.000
Temperatura del ambiente	201	32.29	2.59	0.505	0.000	0.001
Turbiedad del agua	181	11.76	17.00	0.000	0.981	0.606
Temperatura del agua	201	29.79	1.89	0.134	0.000	0.000



Al realizar el análisis a través de los diferentes periodos de lluvia se observó que existen diferencias significativas en las variables: absorción de rayos UV, clorofila, color verdadero, conductividad de campo, carbono orgánico total y soluble, en el oxígeno disuelto, pH de campo, salinidad superficial, temperatura del agua y del ambiente (Cuadro 2).

Cuadro 2. Resultados de análisis de varianza a través de las condiciones de temporal.

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

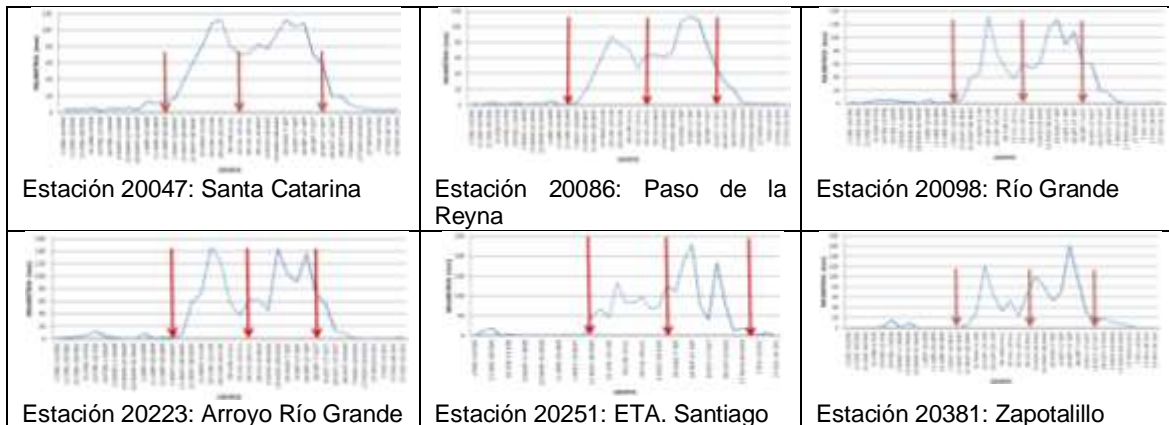


Figura 4. Distribución de muestreos a través del tiempo, de acuerdo a la distribución temporal de la lluvia.

Tomando en cuenta la información del análisis gráfico-visual (Figura 4) y los resultados del análisis de varianza (Cuadro 2) se propone realizar tres mediciones distribuidos en: 1) previo a la temporada de lluvias, preferentemente a finales del



mes de mayo, 2) a mediados de la temporada de lluvias, que puede ser a finales del mes de agosto y principios del mes de septiembre; y 3) al final de la temporada de lluvias que se identificó que puede ser a finales del mes de septiembre y principios del mes de octubre.

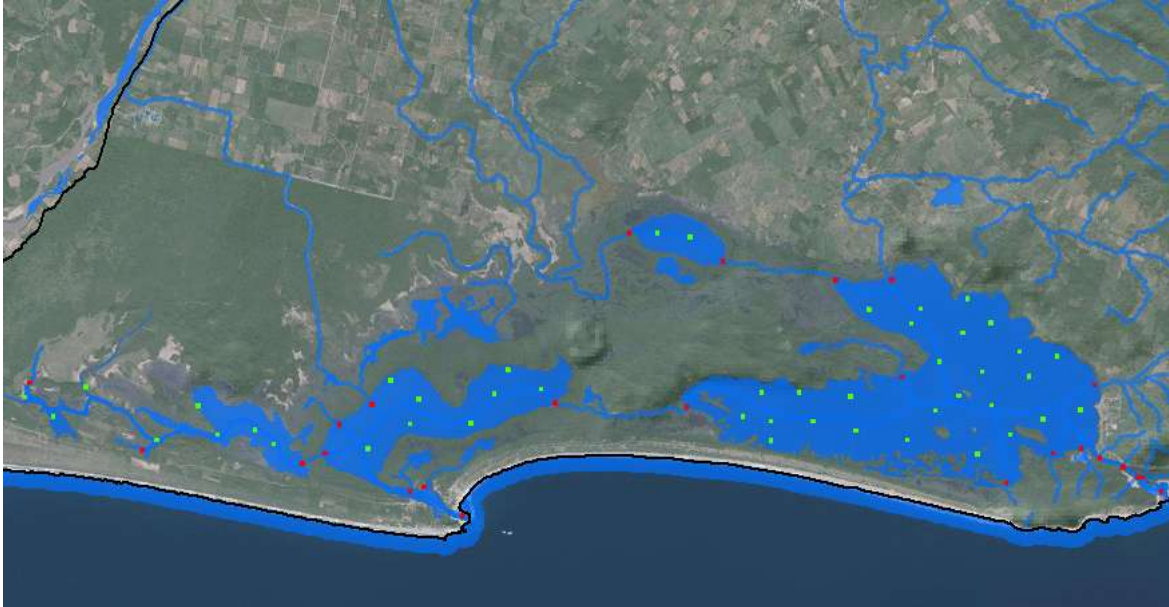


Figura 5. Distribución de muestreos en el espacio en el complejo lagunar Chacahua-Pastoría.

Una vez definido el esquema de muestreo a través del tiempo, se realizó la identificación de los sitios de muestreo de Tipo I, los cuales son sitios previamente definidos en cada laguna con coordenadas geográficas a las cuales se analizarán indicadores de conductividad eléctrica, carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, calcio, magnesio, sodio, potasio, aluminio, hierro, temperatura y oxígeno disuelto. Estas muestras fueron distribuidas en las lagunas, inicialmente en puntos donde desembocan las corrientes de agua intermitentes y permanentes de cada cuerpo de agua (rojos) y el resto de los puntos fueron distribuidos al interior de estas (verdes). La distribución de los puntos de muestreo se encuentra en la Figura 5.

Cuadro 3. Distribución de los tamaños de muestra por tipo para cada laguna que compone el complejo lagunar Chacahua-Pastoría.

Tipo de muestreo	Laguna	Puntos de interés	Puntos adicionales	Subtotal	Periodos de observación	Total de muestras de agua
I	Palmarito	2	2	4	3	12
	Pastoría	13	27	40	3	120
	Chacahua	10	16	26	3	78
II	Ríos San Francisco y Chacalapa	10		10	1	10
Total		35	45	80	--	220



Considerando los elementos de tamaño de muestra, tipos de muestra y frecuencia a través del tiempo, la toma de muestras se distribuyó en 70 puntos definidos por latitud y longitud, adicionalmente se consideró la toma de 10 muestras de agua a través de puntos de libre elección a través de lo largo de los ríos San Francisco y Chacalapa, dando un total de 80 puntos de muestreo los cuales se distribuyen como se observa en el Cuadro 3. Así mismo, considerando que la recolección de muestras de agua se realizarán en tres periodos diferentes para los cuerpos de agua y en un solo periodo para los ríos antes descritos, se calcula que serán tomadas un total de 220 muestras de agua.

Conclusiones

En base al proceso descrito, se realiza la propuesta metodológica para realizar un esquema de muestreo que considera espacio y tiempo. En el primero se expresan puntos distribuidos de forma aleatoria en el espacio en los cuerpos de agua que conforman el complejo lagunar Chacahua-Pastoría, en donde se consideran puntos de muestreo de interés, los cuales inciden en áreas donde confluyen corrientes de agua intermitentes y permanentes en cada laguna (puntos rojos), y se muestran puntos adicionales (puntos verdes) que se encuentran en el interior de estas. En lo referente al muestreo en el tiempo, se consideró realizar el seguimiento del muestreo espacial en tres periodos relacionados con la temporada de lluvias (antes, durante y final), lo cual coadyuvará a realizar un análisis a través de las diferentes tomas, con lo que será posible identificar si existe influencia del temporal en la composición de indicadores tomadas en las lagunas. Así mismo, será posible realizar estudios geoestadísticos mediante la aplicación de análisis de variogramas.

Referencias Bibliográficas

- Gábor H., I. y otros, 2014. The water framework directive: Can more information be extracted from groundwater data? A case study of Seewinkel, Burgenland eastern Austria. *Hydrogeology Journal*, Issue 22, pp. 779-794.
- Giraldo H., R., 2011. *Estadística Espacial*, Bogotá: s.n.
- Griffith, D. A., 2013. Establishing Qualitative Geographic Sample Size in the Presence of Spatial Autocorrelation.. *Annals Of The Association Of American Geographers*, 103(5), pp. 1107-1122.
- Handcock, M. S., 2007. Model-based combination of spatial information for stream networks. *Environmental & Ecological Statistics*, 14(3), pp. 267-284.
- 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), pp. 1113-1126.
- Luna P., V., Alva M., A. & Bernal B., A., 2004. Cuerpos de agua superficiales. En: D. G. d. E. d. Posgrados, ed. *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*. México: UNAM, pp. 117-143.



- Odum, E. P., 1998. *Ecología: El vínculo entre las Ciencias Naturales y las Sociales*. México(D.F.): University of Chicago.
- 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.