

Evaluación de carbono y su equivalente de CO<sub>2</sub> en columna de agua, sedimentos y suelo en el Lago de Coatepeque, El Salvador: evaluación de su peligrosidad

Evaluation of carbon and its equivalent of CO<sub>2</sub> in water column, sediments and soil in Lake Coatepeque, El Salvador: evaluation of its hazard.

Amaya-Monterrosa, O.A<sup>1</sup>, Núñez, M. J<sup>2</sup>, Castaneda-Romero, L. F<sup>3</sup>, Carranza-Estrada, F. A<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Estudiante tesista de la Facultad de Ciencias Agronómicas, UES. [oscar.amaya@ues.edu.sv](mailto:oscar.amaya@ues.edu.sv)

<sup>2</sup>Laboratorio de Investigación en Productos Naturales, Facultad de Química y Farmacia, Universidad de El Salvador. [marvin.nunez@ues.edu.sv](mailto:marvin.nunez@ues.edu.sv)

<sup>3</sup> Asesor. Facultad de Ciencias Agronómicas, UES. [luis.castaneda@ues.edu.sv](mailto:luis.castaneda@ues.edu.sv)

<sup>4</sup> Asesor. Facultad de Ciencias Agronómicas, UES. [freddy.carranza@ues.edu.sv](mailto:freddy.carranza@ues.edu.sv)

### RESUMEN

Con el objetivo de evaluar la dinámica espacial y temporal de carbono y su concentración equivalente de CO<sub>2</sub>, se busca conocer indicadores del cambio climático a nivel local y peligros asociados a lagos volcánicos. La investigación se llevó a cabo desde octubre 2020 a junio 2021, en el Lago de Coatepeque, ubicado entre las latitudes 13°50'07,0"N - 13°53'30,6"N, y longitudes 89°34'30,1"O - 89°31'22,9"O, altitud de 745 msnm y superficie de 25.3 km<sup>2</sup>. Se evaluó la reserva de carbono en agua, sedimento y suelo para generar la línea base de carbono total. Se recolectaron 216 muestras para análisis de carbono, 61 de agua, 56 de sedimentos y 86 de suelo; se midió temperatura, pH, conductividad y transparencia en el espejo de agua. Los datos se analizaron en el programa RStudio versión 3.6.0 para identificar diferencias entre meses, profundidades en estratos del lago y mediante correlaciones de Pearson para evaluar la relación entre carbono total con las variables fisicoquímicas. La mayor concentración de carbono total en agua fue de 61,61 ppm (mg L<sup>-1</sup>), la concentración de carbono total fue homogénea en las 3 profundidades muestreadas (1, 10 y 20 m). No se encontró diferencia significativa en la concentración de carbono en sedimentos superficiales a 15 m de profundidad con muestras de suelos. El contenido de carbono en agua del Lago de Coatepeque fue de 110000,00 MgC, correspondiéndole una concentración de dióxido de carbono equivalente de 400000,00 MgCO<sub>2</sub>-eq. El carbono almacenado en suelo fue de 395,84 MgC ha<sup>-1</sup> con un equivalente de 1452,73 MgCO<sub>2</sub>-eq ha<sup>-1</sup>. En sedimento el carbono almacenado fue 191,00 MgC ha<sup>-1</sup> con un equivalente de 700,97 MgCO<sub>2</sub>-eq ha<sup>-1</sup>. El total de carbono almacenado (agua+sedimento+suelo) en la cuenca del Lago de Coatepeque fue de 4156802,00 MgC y su concentración de dióxido de carbono equivalente de 15251763,34 MgCO<sub>2</sub>-eq (0.015252 GtCO<sub>2</sub>-eq). Las concentraciones de carbono obtenidas en este estudio, son inferiores a los encontrados en otros lagos volcánicos donde han ocurrido erupciones límnicas, por lo que es poco probable que esto suceda en el Lago de Coatepeque.

**Palabras clave:** Carbono total, Lago de Coatepeque, CO<sub>2</sub>-eq, lagos volcánicos, erupciones límnicas.

### SUMMARY

With the objective of evaluating the spatial and temporal dynamics of carbon and its equivalent concentration of CO<sub>2</sub>, we seek to know indicators of climate change at the local level and the dangers associated with volcanic lakes. The research was carried out from October 2020 to June

2021, in Lake Coatepeque, located between latitudes 13°50'07.0"N - 13°53'30.6"N, and longitudes 89°34'30.1"W - 89°31'22.9"W, altitude of 745 meters above sea level and surface area of 25.3 km<sup>2</sup>. The carbon stock in water, sediment and soil was evaluated to generate the total carbon baseline. 216 samples were collected for carbon analysis, 61 water, 56 sediments and 86 soil; temperature, pH, conductivity and transparency in the water mirror were measured. The data was analyzed in the RStudio version 3.6.0 program to identify differences between months, depths in lake strata and through Pearson correlations to evaluate the relationship between total carbon and physicochemical variables. The highest concentration of total carbon in water was 61.61 ppm (mg L<sup>-1</sup>), the concentration of total carbon was homogeneous in the 3 depths sampled (1, 10 and 20 m). No significant difference was found in the carbon concentration in surface sediments at 15 m depth with soil samples. The carbon content in the water of Lake Coatepeque was 110,000.00 MgC, corresponding to a concentration of carbon dioxide equivalent of 400,000.00 MgCO<sub>2</sub>-eq. The carbon stored in the soil was 395.84 MgC ha<sup>-1</sup> with an equivalent of 1452.73 MgCO<sub>2</sub>-eq ha<sup>-1</sup>. In sediment, the stored carbon was 191.00 MgC ha<sup>-1</sup> with an equivalent of 700.97 MgCO<sub>2</sub>-eq ha<sup>-1</sup>. The total carbon stored (water+sediment+soil) in the Lake Coatepeque basin was 4156802.00 MgC and its equivalent carbon dioxide concentration was 15251763.34 MgCO<sub>2</sub>-eq (0.015252 GtCO<sub>2</sub>-eq). The carbon concentrations obtained in this study are lower than those found in other volcanic lakes where limnic eruptions have occurred, so it is unlikely that this will occur in Lake Coatepeque.

**Keywords:** Total carbon, Lake Coatepeque, CO<sub>2</sub>-eq, volcanic lakes, limnic eruptions.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los lagos juegan un papel significativo y cada vez más importante en el ciclo global del carbono, se predice que habrá pérdidas de lagos naturales en regiones donde el clima se está volviendo más seco y en regiones con poblaciones en rápida expansión (Macklin et al., 2018).

El cambio climático y el carbono son una de las principales amenazas naturales que podría afectar a los lagos tropicales, como el Lago de Coatepeque, debido al gradiente de concentraciones de carbono total en el agua y sus sedimentos, además, por su cercanía al volcán de Santa Ana el aporte de carbono desde el interior del campo hidrotermal hacia el cuerpo de agua no es conocido.

En El Salvador, el Lago de Coatepeque es importante no solo por su belleza escénica, sino porque es fuente de actividad económica para la población. En este trabajo se determinó la variabilidad espacial y temporal de las concentraciones de carbono total y su concentración equivalente de CO<sub>2</sub> en el perfil vertical y horizontal del cuerpo de agua, sedimentos depositados y en suelo de la rivera del Lago de Coatepeque, empleando la técnica de combustión oxidativa. Este estudio ayudará a entender las tendencias del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y su relación con el contenido de carbono, además descartar una amenaza potencial para la población que habita en el Lago de Coatepeque ante una posible erupción límnic; se seleccionaron estaciones de muestreo en el espejo de agua considerando la batimetría del lugar, acompañado de registros de conductividad, temperatura, transparencia y pH desde octubre 2020 hasta junio 2021, se generó la línea base de carbono total del Lago de Coatepeque como un dato de referencia para futuras investigaciones sobre tendencias de carbono.

Las concentraciones de carbono total presentan variaciones significativas, debido al aporte que podría tener por encontrarse en un sistema volcánico, actividades en la cuenca hidrográfica y biota del ecosistema. Debido a la ocurrencia de estas peligrosidades naturales se planteó la necesidad de cuantificar las variaciones espaciales y temporales de las concentraciones de carbono y dióxido de carbono equivalente CO<sub>2</sub> eq. a fin de conocer la reserva de carbono y enfocar medidas de adaptación en el cuerpo de agua, permitiendo conservar el lago, los beneficios ambientales y mantener un manejo más eficiente de los recursos económicos destinados a protegerlo.

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1 Ubicación del área de estudio**

La investigación se desarrolló en el Lago de Coatepeque, cuarto cuerpo de agua más grande del país, localizado en la zona occidental de El Salvador (13° 50'07 N, 89° 34,30' O a una altitud de 737 msnm (Fig. 1), se encuentra rodeado por dos ciudades densamente pobladas, Santa Ana (523655 habitantes) y Sonsonate (438960 habitantes), ambos ubicados dentro de un radio de 25 km del volcán Ilamatepec (Hernández & Jicha, 2019). Durante el año el lago presenta temperaturas de 17 a 31°C, el mes con más lluvia es septiembre, con un promedio de 135 mm, el mes más resplandeciente es marzo, con un promedio de 6,9 kWh, el periodo más ventoso del año dura 5 meses, de octubre a abril, con velocidades promedio del viento de 12,6 km h<sup>-1</sup> (<https://es.weatherspark.com/y/12270/Clima-promedio-en-Coatepeque-El-Salvador-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-WindSpeed>).

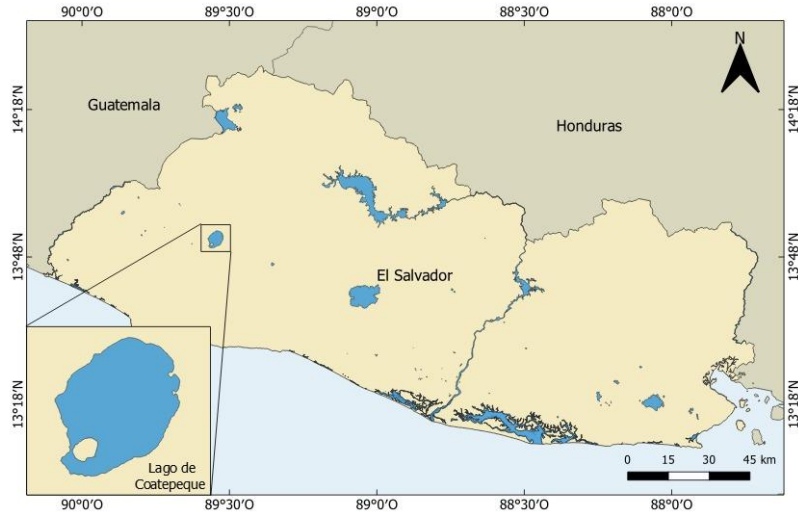


Fig. 1: Área de estudio, Lago de Coatepeque.

## 2.2 Fase de campo

Desde octubre 2020 a junio 2021, se recolectaron 216 muestras para análisis de carbono total cubriendo el espejo de agua y cuenca de drenaje, 61 muestras fueron de agua, 56 de sedimentos depositados a 15 m de profundidad y 86 de suelo extraídas de la ribera del Lago de Coatepeque representadas en figura 2. Los sitios de muestreo fueron elegidos asegurando que todo el espejo de agua y las propiedades del lago estuviesen representados. Cada punto se muestreó una vez durante seis meses. Adicionalmente se realizaron mediciones de carbono en junio 2021 periodo durante el cual el lago cambió el color de sus aguas naturales a turquesa, actividad inicialmente no declarada en la metodología, pero dado el aporte positivo al estudio se determinó carbono en sedimentos depositados a 15 m de profundidad, durante y 10 días después de concluido el fenómeno.

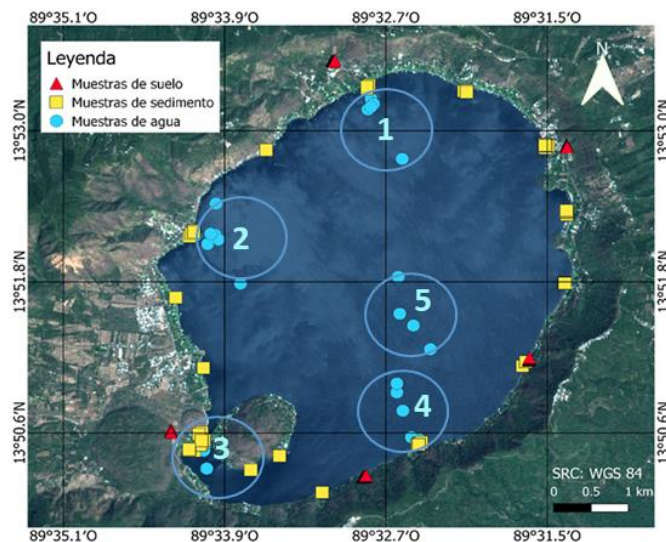


Fig. 2. Mapa de puntos de muestreo en agua (círculos), sedimentos depositados (cuadrados) y suelo (triángulos).

### **2.2.1 Metodología de muestreo en agua**

Se recolectaron muestras de agua en perfil vertical y horizontal utilizando botella Nisking de 10 litros, considerando la batimetría. Se registró temperatura, transparencia conductividad, y Carbono total a profundidades de 1, 10 y 20 m. Se seleccionaron 5 sitios de muestreo representativos del cuerpo de agua. Las campañas de monitoreo fueron realizadas con frecuencia mensual durante octubre, noviembre, diciembre 2020, febrero, marzo, abril, mayo y junio 2021.

El carbono fue convertido a concentración de CO<sub>2</sub>-eq multiplicando el contenido de carbono total por 3,67, este valor es la proporción molecular entre el peso del dióxido de carbono [44 g mol<sup>-1</sup>] y el del carbono [12 g mol<sup>-1</sup>] (Kauffman et al., 2013).

### **2.2.2 Metodología de muestreo en suelo**

Se seleccionó un estrato de 300 metros de longitud desde la orilla del lago para extraer muestras superficiales, en cada sitio de muestreo se recolectaron muestras de suelo superficial empleando aros de PVC (8,6 cm de diámetro, 2 cm de profundidad, ~116 cm<sup>3</sup> de suelo). Se recolectaron muestras agrupadas de suelo superficial para evaluar gradientes direccionales de carbono en 5 sectores de la cuenca del Lago de Coatepeque con diferente uso de la tierra (como suelo forestal, tierras agrícolas, pastizales, asentamientos y volcánicos).

Adicionalmente se extrajeron 2 núcleos de suelo para el análisis de carbono por medio de cilindros de PVC con diámetro de 8 cm por 50 cm de longitud, se seleccionó una zona levemente impactada por actividades humanas en la ribera suroriente del lago en la cual la Fundación Coatepeque es propietaria y mantiene vigilancia con guarda recursos.

Una vez extraídos los núcleos de suelo, uno fue seccionado en partes de 2 cm de longitud, secando en una estufa a 60°C durante 24 horas, luego se homogenizó haciendo pasar la muestra por tamiz de 2 mm de poro de malla, se colocó en la geometría correspondiente al detector de carbono Analyzer Multi N/C 3100 de marca AnalytikJena, y se determinó la concentración de carbono total para cada una de las muestras.

Las muestras para análisis de carbono fueron trasladadas al Laboratorio de Química Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, almacenadas en bolsas ziploc a baja temperatura en hielera; en este laboratorio se procedió al tratamiento de las muestras empleando métodos estándares para evaluar las existencias y los factores de emisión de carbono (Fourqurean & UICN, 2015), posteriormente se realizó la determinación de las concentraciones de carbono total empleando la técnica de combustión oxidativa.

### **2.2.3 Metodología de muestreo en sedimento**

Al no contar con una metodología para medir carbono en lagos, se recolectaron muestras de sedimento depositados a 15 metros de profundidad empleando buceo autónomo con bolsas tipo Ziploc de plástico (~1,0 kg de sedimento). Las muestras fueron preparadas en el laboratorio siguiendo procedimientos estándares antes de la medición analítica del carbono total en sedimentos descritos para ambientes geológicos como la cuenca del Lago de Coatepeque.

## **2.3 Análisis de Carbono Total CT**

Para determinar el carbono total se registra el contenido de carbono orgánico e inorgánico y el carbono elemental. La muestra se dosifica automáticamente mediante una bomba de inyección en el tubo de atomización, y el dióxido de carbono que se produce se detecta. La digestión se obtiene mediante una oxidación de alta temperatura termocatalítica en presencia de catalizadores especiales.

La parte alícuota de la muestra se dosifica directamente en la zona caliente del reactor relleno (tubo de atomización). Allí se produce, con ayuda del catalizador, la pirólisis y oxidación de las muestras

en la corriente de gas portador ecuación (1). El gas portador sirve al mismo tiempo como medio de oxidación.



Donde R es la sustancia que contiene carbono.

La concentración de CO<sub>2</sub> se registra varias veces en un segundo. De esta sucesión de señales se forma una integral a lo largo del tiempo. La integral es proporcional a la concentración del carbono en la solución de medición. (Analytik Jena AG, 2020)

## 2.4 Coloración Turquesa

Adicionalmente se analizaron 20 muestras de sedimento depositados cuando el Lago de Coatepeque manifestó coloración turquesa, actividad inicialmente no contemplada en el estudio por lo impredecible del evento, pero que afortunadamente brindó la oportunidad de conocer el comportamiento de las concentraciones de carbono con datos antes durante y después del apareamiento del fenómeno.

## 2.5 Análisis estadístico

Los datos se analizaron en el programa RStudio versión 3.6.0 mediante análisis de varianza para identificar diferencias temporales y espaciales, además, mediante correlaciones de Pearson para evaluar la relación entre el carbono total con las variables fisicoquímicas. Se practicó el método estadístico de análisis de varianza de un factor, para contrastar los valores de carbono total en los cuatro grupos: agua, sedimento, suelo y núcleo de suelo. Se realizaron pruebas de comparación múltiple a posteriori para identificar cuáles hipótesis eran diferentes entre sí e identificar posibles contribuciones antropogénicas en cada matriz en la zona de estudio.

Se empleó el método de comparación múltiple “Diferencia Mínima Significativa DMS” para comparar más de dos medias y considerar diferentes 2 tratamientos, se utilizó la prueba de múltiples rangos para identificar homogeneidad en los grupos (Beaver et al., 2010). Se graficó concentración de carbono total en relación con los sitios y se estableció correlación entre la concentración espacial de carbono y tiempos de muestreo.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Variación temporal del contenido de carbono total en agua.

En general la mayor concentración de carbono total en agua fue de 61,61 ppm (mg L<sup>-1</sup>) ocurrida en febrero 2021 y la mínima de 56,39 ppm en octubre 2020, el rango fue de 5,22 ppm. En el cuadro 1, se presenta las concentraciones promedio de carbono en muestras de agua con diferentes estadísticos para las variables analizadas del Lago de Coatepeque n=60, recolectadas durante octubre 2020 a marzo 2021; en octubre 2020 se presentó la menor concentración promedio de carbono total 56,96 ppm, correspondiéndole la máxima temperatura de 27,83 °C y máximo pH 8,36 al compararse con los otros meses. Existe variación de la concentración de carbono total en los meses que se realizó el estudio; en un mismo mes no se percibe variación en la concentración de carbono (Gráfico 1). Según la prueba de múltiples rangos los grupos de agua colectados en octubre y noviembre 2020 sus medias no son diferentes entre sí, mientras diciembre 2020, febrero y marzo 2021 sus medias difieren entre sí. Lo anterior hace suponer que debe considerarse la estacionalidad al realizar mediciones de carbono, posiblemente por aporte de materia orgánica en el cuerpo de agua, cuerpos muy sensibles a cambios climáticos.

Cuadro 1. Concentraciones de carbono y parámetros fisicoquímicos en agua por mes.

Año-mes	n	C prom. (ppm)	Var (ppm <sup>2</sup> )	$\sigma$ (ppm)	T (°C)	pH	*Trns p. (m)	Cond. (ppm)
2020-10	10	56,96	0,36	0,60	27,83	8,36	5,25	915,40
2020-11	9	57,10	0,06	0,25	26,17	8,38	5,16	931,22
2020-12	10	58,32	0,15	0,39	25,44	8,28	6,04	939,20
2021-02	17	60,59	0,43	0,66	23,97	8,18	3,04	972,94
2021-03	14	59,35	0,80	0,90	24,47	8,24	5,83	981,07

\*Transparencia con disco Secchi.

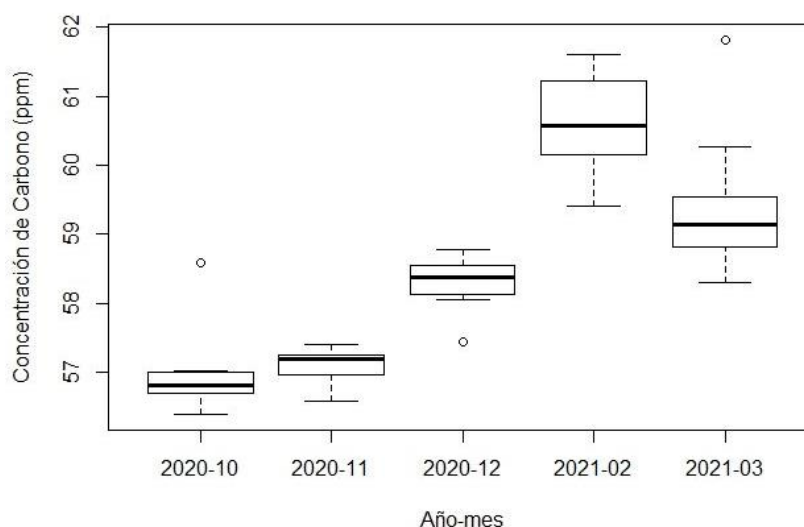


Gráfico 1. Distribución de la concentración de carbono total en agua contra tiempo, en el periodo investigado.

### 3.1.1 Variación del contenido de Carbono total en perfil vertical de la columna de agua.

Inicialmente se recolectaron muestras a 50; 80; y 100 m de profundidad registrando valores de carbono total de 61,61; 61,23; y 61,56 ppm respectivamente, debido a que no fueron diferentes se optó por las profundidades 1, 10 y 20 m que tienen una logística menos complicada y menores costos. La concentración de carbono total fue homogénea en las 3 profundidades muestreadas (1, 10 y 20 metros), cuadro 2; a 20 m la concentración promedio de carbono total fue 58,56 ppm no lográndose diferenciar con los valores obtenidos a 1y 10 m de profundidad, esto posiblemente se deba a que el lago se encontraba con estratificación relativamente estable, aunque adicionalmente, no se aprecia variabilidad ( $p > 0,05$ ) en la concentración promedio de carbono total en el perfil vertical de la columna de agua, los resultados de la prueba de múltiples rangos confirma esta afirmación, en el cuadro 2 se presenta el resumen de las variables.

Respecto a las demás variables no hay cambio entre la concentración de Carbono-Temperatura y Carbono-pH. Debido a que el carbono está distribuido uniformemente en todo el cuerpo de agua y no

se perciba acumulación, es poco probable que ocurra una erupción límnica. Similar comportamiento presenta el carbono medido como anión bicarbonato en el Lago de Coatepeque (Cabassi et al., 2019). El análisis de variancia indica que existe correlación negativa entre la zona eufótica y la concentración de carbono, confirmando que los organismos fitoplanctonicos prefieren esta zona para alimentación.

Cuadro 2. Concentraciones de carbono en agua a 1, 10 y 20 m de profundidad.

Profundidad (m)	n	Carbono promedio ppm	Varianza ppm <sup>2</sup>	$\sigma$ ppm	T (°C)	pH	Transparencia (m)	Conduct. (ppm)
1	25	58,46	2,33	1,53	25,92	8,30	5,05	941,48
10	13	59,16	1,71	1,31	24,71	8,26	4,60	956,08
20	19	58,56	2,21	1,49	25,23	8,25	5,13	953,16

Al graficar el contenido de carbono en agua a las profundidades de 1; 10 y 20 m, no se observa variación ente las variables lo que implica homogeneidad de carbono en la columna de agua a diferentes profundidades (Gráfico 2). Es necesario realizar mediciones a mayores profundidades y en mayor espacio temporal para ver si es posible observar cambios.

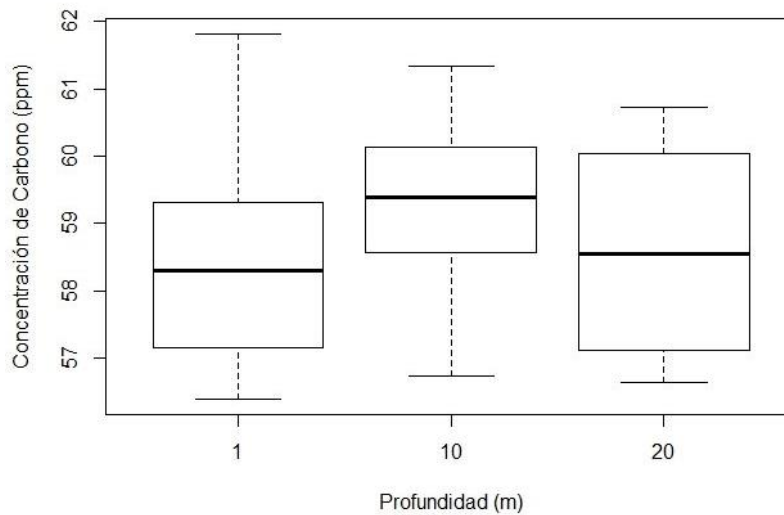


Gráfico 2. Distribución de la concentración de carbono contra profundidad.

### 3.1.2 Variación espacial del contenido de Carbono total en Agua.

De los cinco sitios seleccionados, el sitio 5 localizado al noreste del lago presenta mayor concentración de carbono 59,48 ppm, profundidad (112 m), los demás presentan valores homogéneos cuadro 3, lo que sugiere que las corrientes y el viento desplacen partículas sobre este punto. El punto tres cercano a la fumarola y donde el lago recibe las descargas subterráneas no presenta variación en la concentración de carbono comparado con los demás puntos excepto al punto 5 (Gráfico 3).



Cuadro 3. Concentraciones de carbono total en agua por sitio de muestreo.

Sitio	n	Carbono promedio (ppm)	Varianza (ppm <sup>2</sup> )	σ (ppm)	T (°C)	pH	Transp. (m)	Conduc. t. (ppm)
P1	12	58,58	2,92	1,71	25,32	8,27	4,89	955,58
P2	12	58,72	1,27	1,13	25,17	8,25	5,50	945,92
P3	10	58,21	1,72	1,31	25,87	8,30	4,78	947,40
P4	12	58,77	2,38	1,54	25,44	8,29	4,82	946,17
P5	14	59,48	3,46	1,86	24,89	8,24	4,45	968,29

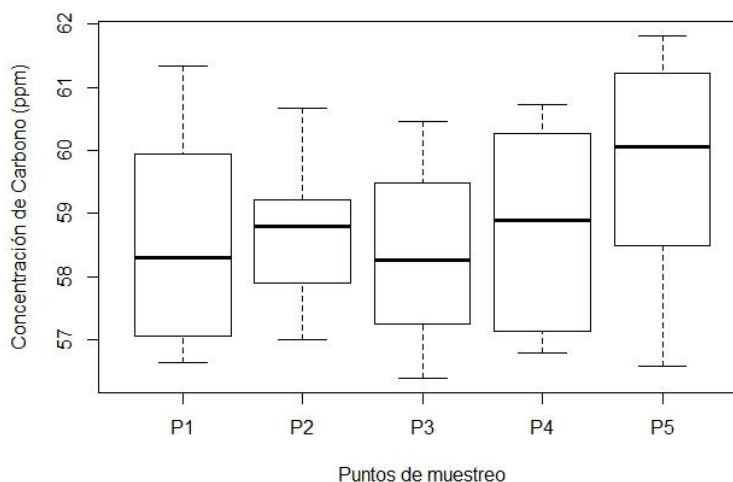


Gráfico 3. Distribución espacial de carbono en agua en ppm (mgL<sup>-1</sup>) por puntos de muestreo, seleccionados espacialmente en el Lago de Coatepeque.

### 3.1.3 Cálculo del contenido de carbono en el cuerpo de agua del Lago de Coatepeque.

El contenido total de carbono en agua se determinó considerando el volumen total del lago  $1,8 \text{ km}^3 = 1,8 \times 10^{12} \text{ L}$ .

Carbono del agua =  $V_{\text{agua}} (\text{L}) * [ ] C$ .

Donde: [ ] C es la concentración de carbono expresada en  $\text{g L}^{-1}$ .

Para 60 muestras de agua, el promedio de carbono fue  $C = 58.76 \text{ ppm} = 0,05876 \text{ g L}^{-1}$ , tenemos:

Carbono del agua =  $1,8 \times 10^{12} \text{ L} \times 0,05876 \text{ g L}^{-1}$

Carbono del agua =  $1,058 \times 10^{11} \text{ g C} = 0,11 \times 10^{12} \text{ g C} = \mathbf{0,11 \text{ TgC} = 0,00011 \text{ GtC}}$

El dióxido de carbono equivalente de todo el volumen de agua del Lago de Coatepeque es:

$0,11 \text{ Tg C} \times 3,67 = \mathbf{0,4 \text{ TgCO}_2 \text{ eq} = 0,0004 \text{ GtCO}_2\text{-eq}}$

El contenido total de carbono en agua fue convertido en  $\text{CO}_2 \text{ eq}$  multiplicando por 3,67, que es la relación de pesos moleculares entre el dióxido de carbono [ $44 \text{ g mol}^{-1}$ ] y el carbono [ $12 \text{ g mol}^{-1}$ ].

Este valor de carbono sugiere la producción primaria de carbono en el lago y la disponibilidad de nutrientes, meteorización de carbonatos, aportes del sistema volcánico y flujos de agua subterránea, el resultado concuerda con el estimado a nivel global de hasta 150 Pg C a<sup>-1</sup> (Tranvik et al., 2009), para el caso del Lago de Coatepeque sería 0,00011 Pg C.

### 3.1.4 Correlación entre variables

El análisis de varianza de las variables fisicoquímicas permitió determinar que la temperatura controla más la concentración de carbono en el lago, con un coeficiente de Pearson de -0,78; esto es debido muy probablemente al gradiente estacional de luz solar recibida por el espejo de agua que hace que el carbono se deposite o se evapore como CO<sub>2</sub> a la atmosfera. En la figura 3 se presentan los coeficientes de correlación de Pearson entre las variables analizadas, puede notarse que la variable de interés carbono total, presentó una correlación significativa e inversa con la temperatura, el pH y transparencia en el perfil vertical. Dado que la mayor correlación con carbono se presenta con la temperatura se debe considerar lo que podría ocurrir a futuro si la temperatura global incrementa en los próximos años.

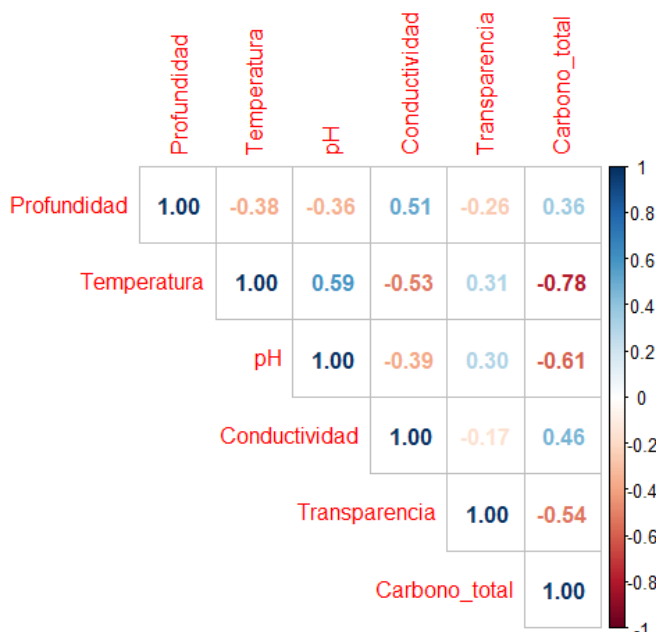


Fig. 3. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables en agua.

### 3.2 Variación espacial del contenido de carbono total en suelo.

La mayor concentración de carbono en suelo fue de 28,2 % y la mínima de 7,92 % (en peso), n = 70. En el cuadro 6, se presenta el resumen de las variables por sitios de muestreo el sitio con más bosque SL1 presenta mayor concentración de carbono, figura 4.

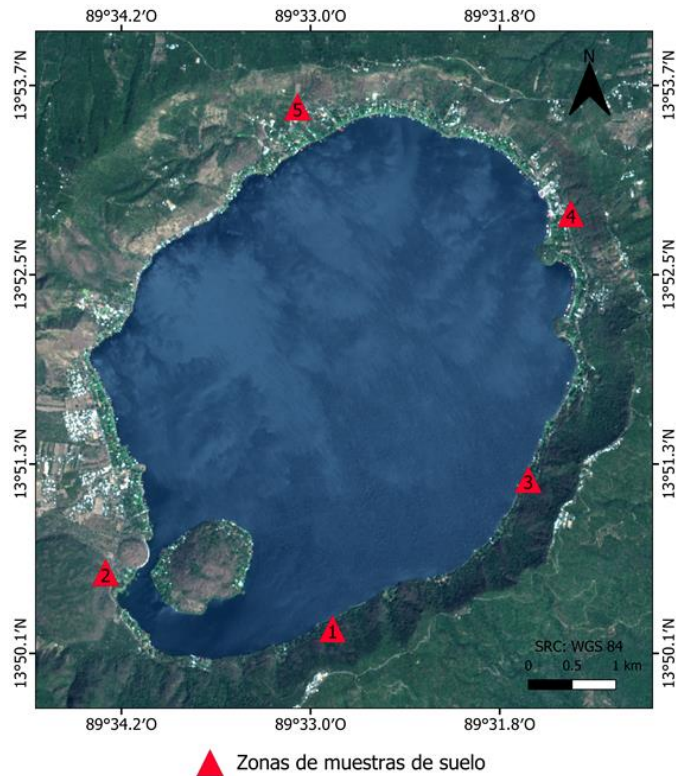


Fig. 4. Mapa ubicación de sitios de muestreo de suelo para medida de carbono en la cuenca.

Cuadro 6. Concentraciones de carbono total en suelo espacialmente distribuidas.

Sitio	n	C prom. (% en peso)	Varianza. (% <sup>2</sup> )	$\sigma$ (%)
SL1	10	15,02	27,62	5,26
SL2	15	11,73	4,27	2,07
SL3	16	12,18	8,35	2,89
SL4	14	10,82	0,98	0,99
SL5	15	10,59	1,28	1,13

Distribución de la concentración de carbono en suelo (Gráfico 3), en los diferentes sitios de muestreo. La mayor Concentración de Carbono se observa en el sitio 1 y presenta mayor variabilidad en los resultados.

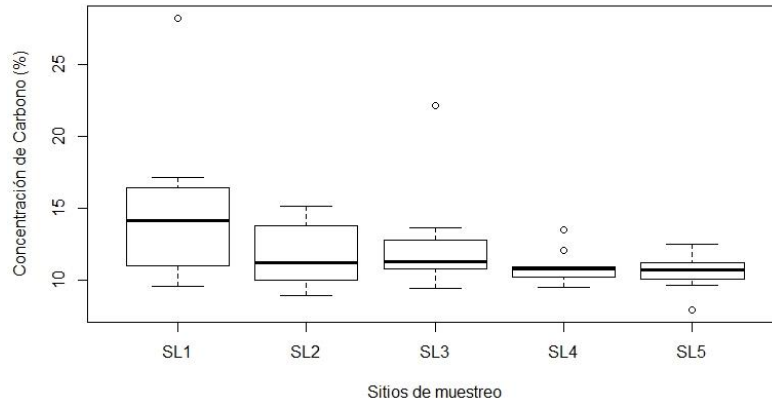


Gráfico 3. Distribución de la concentración de carbono en suelo % (en peso) por sitios de muestreo.

### 3.2.1 Cálculo de la reserva de carbono en suelo de la cuenca Lago de Coatepeque.

La reserva total de carbono en suelo se determina considerando la masa a la profundidad de suelo muestreada. Para este estudio, la reserva total de carbono del suelo se determinó dividiendo el horizonte del suelo en intervalos, a profundidad de 0 a 2 cm. La masa de carbono del suelo por intervalo de profundidad muestreado se calcula de la siguiente manera:

Carbono del suelo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) = densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ) x intervalo de profundidad del suelo (cm) x % C.

Donde: % C es la concentración de carbono expresada como un número entero.

Para 70 muestras de suelo, el promedio de carbono fue  $CT = 11,88\%$  y considerando la densidad aparente de  $1 \text{ g cm}^{-3}$ , tenemos.

Carbono en Suelo =  $23,76 \text{ Mg ha}^{-1}$  =

Calculando la concentración de  $\text{CO}_2$  equivalente en suelo =  $23,76 \text{ Mg ha}^{-1} \times 3,67 = 87,20 \text{ MgCO}_2\text{-eq ha}^{-1} = 87,20 \text{ tCO}_2\text{-eq ha}^{-1}$

Tomando el área total de la cuenca del Lago de Coatepeque de  $90 \text{ km}^2 \sim 9000 \text{ ha}$  tenemos:

Carbono total del área de la cuenca =  $(23,76 \text{ Mg ha}^{-1}) \times (9000 \text{ ha}) = 213840 \text{ MgC} = 0,000213840 \text{ GtC}$

Conversión de carbono a dióxido de carbono equivalente  $\text{CO}_2 \text{ eq}$

$213840 \text{ Mg C} * 3,67 = 784792,8 \text{ MgCO}_2 \text{ eq}$

El  $\text{CO}_2 \text{ eq}$  de la cuenca del Lago de Coatepeque es  **$784792,8 \text{ Mg} = 0,0007847928 \text{ GtCO}_2 \text{ eq}$**

La densidad total de carbono o reserva total de carbono es convertida en  $\text{CO}_2 \text{ eq}$  multiplicando por 3,67, que es la relación de pesos moleculares entre el dióxido de carbono [ $44 \text{ g mol}^{-1}$ ] y el carbono [ $12 \text{ g mol}^{-1}$ ] (Stocker, 2012).

La dinámica de carbono en el Lago de Coatepeque está influenciada por el aporte de fuentes alóctonas como la meteorización, la materia orgánica del suelo, meteorización, raíces terrestres y aporte de la cámara magmática subyacente.

### 3.2.2 Variación vertical del contenido de Carbono total en Suelo.

Distribución de carbono total en (% en peso) en un núcleo de suelo de 32 cm de longitud colectado manualmente (Gráfico 4), extraído del sitio SL1 seleccionado por abundancia de bosque y poco impacto por urbanización en el Lago de Coatepeque. Se emplearon tubos de PVC de 8,6 cm de diámetro, se observa poca variabilidad en los datos, con una mediana cercana al 12% (% en peso).

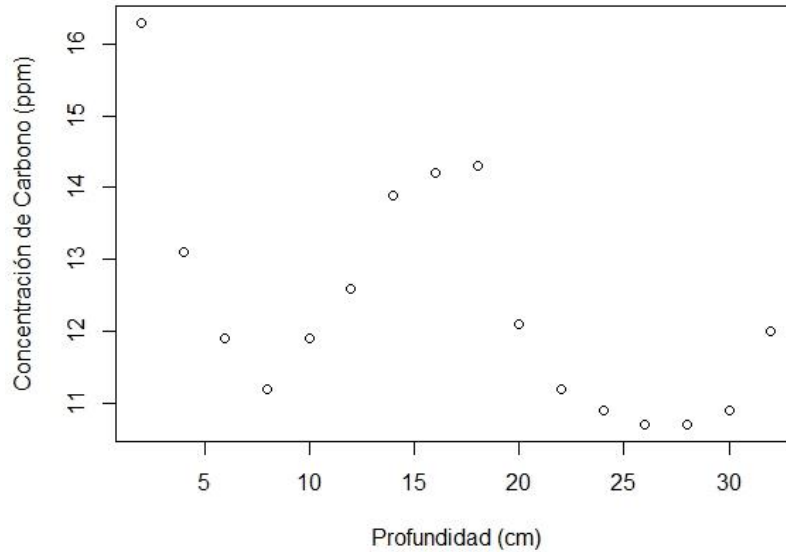


Gráfico 4. Concentración de carbono en (%) contra profundidad, para un núcleo de suelo.

Para un núcleo de suelo de 32 cm de longitud, cortándolo en 16 secciones de suelo, el promedio de carbono fue  $CT = 12,37\%$  y considerando la densidad aparente de  $1\text{ g cm}^{-3}$ , tenemos.

Carbono del suelo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) = densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ) x intervalo de profundidad del suelo (cm) x % C.

Carbono en Suelo =  $395,84\text{ MgC ha}^{-1}$

Calculando la concentración de  $\text{CO}_2$  equivalente en suelo =  $395,84\text{ MgC ha}^{-1} \times 3,67 =$

**$1452,73\text{ MgCO}_2\text{-eq ha}^{-1} = 0,00000145273\text{ GtCO}_2\text{-eq ha}^{-1}$**

Tomando el área total de la cuenca del Lago de Coatepeque de  $90\text{ km}^2 \sim 9000\text{ ha}$

Carbono total del área de la cuenca =  $(395,84\text{ Mg ha}^{-1}) \times (9000\text{ ha}) = \mathbf{3562560\text{ MgC}} =$

**$0,00356256\text{ GtC}$**

Conversión de carbono a dióxido de carbono equivalentes  $\text{CO}_2\text{ eq}$

$3562560\text{ Mg C} \times 3,67 = 13074595,2\text{ MgCO}_2\text{ eq}$

El  $\text{CO}_2\text{ eq}$  de la cuenca del Lago de Coatepeque es  **$13074595,2\text{ Mg} = 0,0130745952\text{ GtCO}_2\text{-eq}$**

### 3.3 Variación temporal del contenido de Carbono total en Sedimento depositado.

Analizando los resultados por mes, el carbono total en sedimentos del Lago de Coatepeque varió en un rango de  $11,5\%$  en abril 2021 a  $14,8\%$  en diciembre 2020, con un promedio de  $12,8\%$ . En diciembre 2020 el carbono presenta una ligera diferencia respecto a los demás meses. Los sedimentos en el Lago de Coatepeque son ricos en C por lo que se consideran orgánicos. Lo anterior indica que no hay una relación directa entre los meses muestreados y el contenido de C total sedimentario en el Lago de Coatepeque, resultados en el cuadro 7. En cada sitio de muestreo se recolectaron muestras de sedimento depositados a 15 metros de profundidad con ayuda de buceo autónomo con bolsas tipo Ziploc de plástico ( $\sim 1,0\text{ kg}$  de sedimento), puntos de muestreo se presentan en la figura 5.

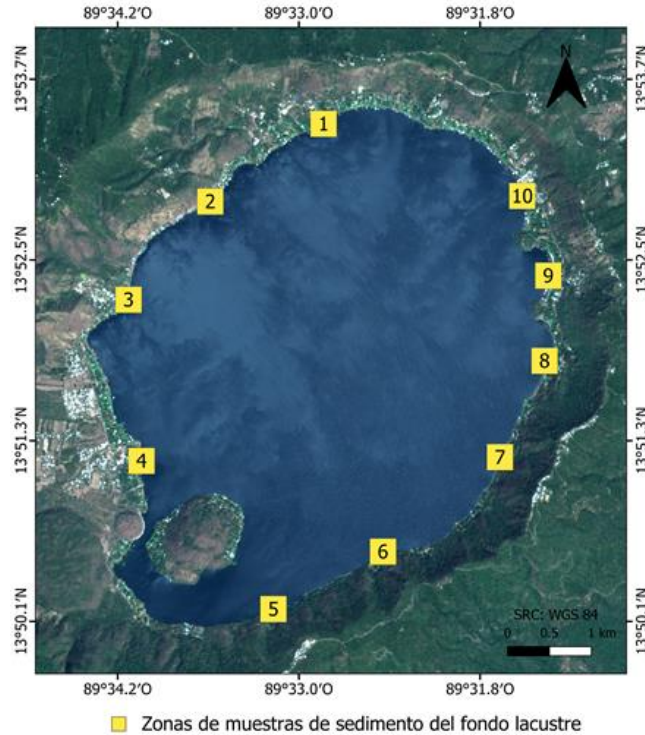


Fig. 5. Mapa ubicación puntos de muestreo de sedimento depositado a 15 m de profundidad.

Se ha sugerido que los almacenes de carbono en los lagos provienen de entradas de carbono orgánico procedente de fuentes terrestres (alóctonas) y su subsecuente mineralización. Sin embargo, el Lago de Coatepeque no tiene afluentes superficiales y su cuenca de captación es reducida, por lo que la fuente de carbono debe ser prioritariamente la producción primaria autóctona que, por tratarse de un lago oligotrófico, puede considerarse baja.

Cuadro 7. Varianza y concentraciones promedio de carbono total en sedimento por mes.

Grupos	n	Promedio %	Varianza % <sup>2</sup>
<b>Noviembre 2020</b>	10	13,57	7,33
<b>Diciembre 2020</b>	5	14,78	3,04
<b>Marzo 2021</b>	6	12,88	3,80
<b>Abril 2021</b>	7	11,53	0,93
<b>Mayo 2021</b>	8	11,80	2,40
<b>Junio 2021</b>	10	12,28	5,71
<b>Julio 2021</b>	10	12,95	3,45

Distribución de la concentración de carbono en sedimento depositado (Gráfico 5) del lago a 15 metros de profundidad, el peso promedio de la muestra de sedimento fue de 1 kg, extraída con buzo durante el periodo de estudio.

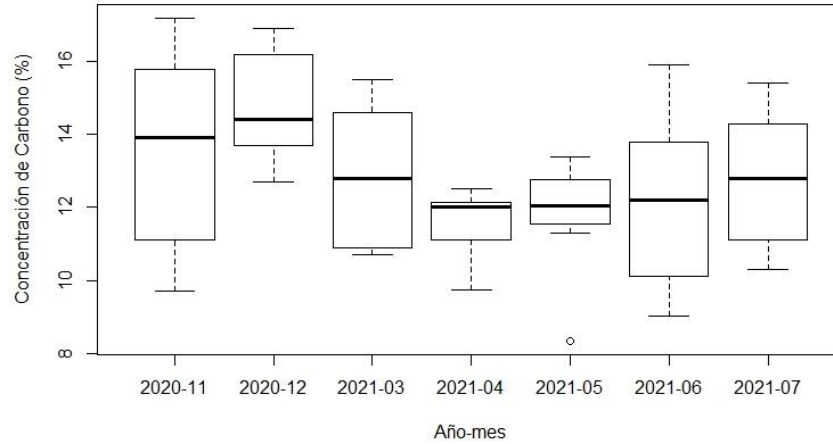


Gráfico 5. Distribución de la concentración de carbono en sedimento por mes.

### 3.3.1 Variación espacial del contenido de Carbono total en Sedimento depositado.

El carbono en sedimento del Lago de Coatepeque considerando los promedios en cada punto de muestreo (Gráfico11, Cuadro 8) varió en un rango de 11,97 % en el punto 3 a 14,03 % en el punto 4 situado cerca de la fumarola (figura 8).

Tomando en cuenta que los sedimentos terrígenos contienen alrededor del 3-5 % puede decirse que son sedimentos ricos en carbono, la prueba de múltiples rangos resultó homogeneidad en las concentraciones, se podría decir que en los puntos muestreados no hay anomalía en el contenido de carbono. Se seleccionaron 10 puntos de muestreo de sedimento depositado colectados a 15 metros de profundidad, denominados como: La Bendición SD1, Vuelta de Oro SD2, Constitución SD3, Castillo del Rey SD4, Agua Caliente SD5, La Peña SD6, Los Pinos SD7, Monterrey SD8, Bajadero el Estoraque SD9, Santa Mónica SD10, resultados en el cuadro 8.

Cuadro 8. Varianza y concentraciones promedio de carbono en sedimentos por puntos de muestreo.

<b>Puntos</b>	<b>n</b>	<b>C prom. % en peso</b>	<b>Varianza %<sup>2</sup></b>
<b>SD1</b>	7	13,44	3,20
<b>SD2</b>	7	12,21	6,21
<b>SD3</b>	7	11,97	3,66
<b>SD4</b>	7	14,03	4,36
<b>SD5</b>	7	12,98	8,23
<b>SD6</b>	6	12,72	1,29
<b>SD7</b>	5	12,28	9,27
<b>SD8</b>	4	12,08	1,51
<b>SD9</b>	3	12,51	9,87
<b>SD10</b>	3	13,47	1,00

Distribución de la concentración de carbono en sedimento depositado (Gráfico 6) del lago a 15 m de profundidad, en diferentes puntos de muestreo. La concentración de carbono (% en peso) en el punto 4 presenta mayor concentración a los demás sitios.

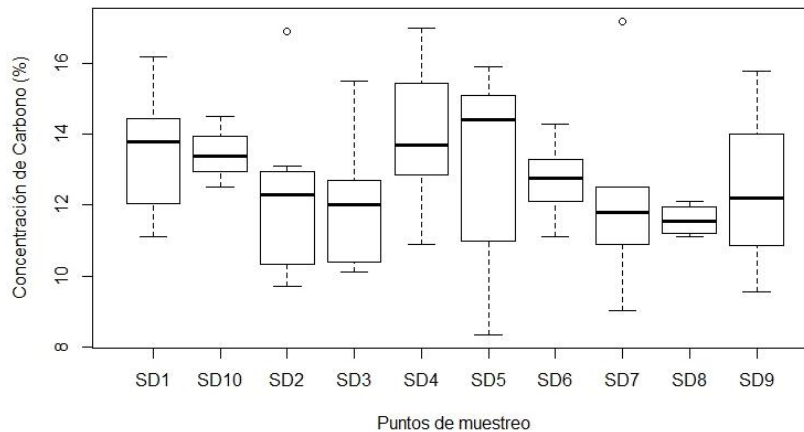


Gráfico 6. Distribución de la concentración de carbono (% en peso) en sedimento depositado contra puntos de muestreo.

### 3.3.2 Cálculo de la reserva de carbono en sedimento depositado a 15 metros de profundidad en el Lago de Coatepeque.

La reserva total de carbono en sedimento depositado se determinó considerando la masa a la profundidad de suelo muestreada. Para este estudio, la reserva total de carbono del sedimento se determinó dividiendo el perímetro del sedimento depositado a 15 metros de profundidad y a 15 cm de la capa de sedimento depositado. La masa de carbono del suelo por intervalo de profundidad muestreado se calcula de la siguiente manera:

Carbono del sedimento ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) = densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ) \* intervalo de profundidad del suelo (cm) \* % C.

Donde: %C es la concentración de carbono expresada como un número entero.

Para 56 muestras de sedimento, el promedio de carbono fue  $\text{CT} = 12,76\%$  y considerando la densidad aparente de  $1 \text{ g cm}^{-3}$ , tenemos.

Carbono en Sedimento = **191,40  $\text{MgC ha}^{-1}$**

Tomando el área total del espejo de agua del Lago de Coatepeque de  $25,3 \text{ km}^2 \sim 2530 \text{ ha}$

Carbono total del área de la cuenca =  $(191,4 \text{ Mg ha}^{-1}) \times (2530 \text{ ha}) = \mathbf{484242 \text{ Mg C} =}$

**0,000484242 GtC**

Conversión de carbono a dióxido de carbono equivalentes  $\text{CO}_2 \text{ eq}$

$484242 \text{ Mg C} * 3,67 = 1777168,14 \text{ MgCO}_2 \text{ eq}$

El  $\text{CO}_2 \text{ eq}$  de la cuenca del Lago de Coatepeque es **1777168,14  $\text{MgCO}_2 \text{ eq} =$**

**0,00177716814 GtCO<sub>2</sub>-eq**

La densidad total de carbono o reserva total de carbono es convertida en  $\text{CO}_2 \text{ eq}$  multiplicando por 3,67, que es la relación de pesos moleculares entre el dióxido de carbono [ $44 \text{ g mol}^{-1}$ ] y el carbono [ $12 \text{ g mol}^{-1}$ ].

Este valor es la reserva o captura de carbono en sedimentos del Lago de Coatepeque considerando su extensión espacial y capacidad para preservar carbono, confirma que el lago secuestra grandes cantidades de carbono en sus sedimentos, a nivel global los lagos contienen hasta 820 Pg de C en sus



sedimentos (Tranvik et al., 2009), el Lago de Coatepeque contribuye con 0,00048 Pg C a esta cantidad.

### 3.3.3 Variación temporal del contenido de Carbono total en sedimento depositado antes durante y después de la coloración turquesa del agua.

Analizando los resultados por el color del agua, la concentración de carbono en sedimento depositado (% en peso), a 15 m de profundidad del lago, en muestras extraídas en periodos donde el agua del lago cambia su color natural (azul-verde) a turquesa, los resultados se presentan en el cuadro 9.

Cuadro 9. Varianza y valores promedio de carbono total en sedimento, comparados durante cambio de coloración turquesa.

Grupos	n	Promedio % en peso	Varianza % <sup>2</sup>
ANTES	36	12,84	11,95
DURANTE	10	12,95	3,45
DESPUÉS	10	12,28	5,71

La concentración de carbono total medida 27 días antes y 10 días después de finalizada la coloración turquesa es similar (Gráfico 7). Con base en lo anterior, resulta interesante el hecho que el porcentaje promedio de C total en el Lago de Coatepeque en su color natural sea igual al color cuando está turquesa. Lo anterior indica que no hay una relación directa entre el estado de coloración y el contenido de C total sedimentario en el Lago de Coatepeque.

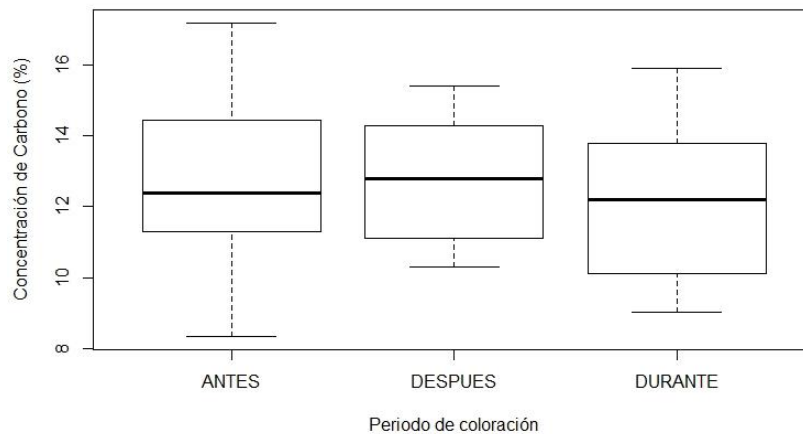


Gráfico 7. Distribución de carbono total por periodos de coloración turquesa.

### 3.4 Comparación con otros estudios

Finalmente, en los cuadros 10 y 11 se comparan los resultados de valores de carbono obtenidos en esta investigación en cuerpos de agua, sedimentos y suelos en distintas regiones del mundo.

Cuadro 10. Comparación de concentraciones de carbono en agua, sedimentos y suelo obtenidos en este estudio con otros lagos.

<b>AGUA</b>						
<b>Nombre</b>	<b>CTP</b>	<b>COP</b>	<b>COT</b>	<b>CT</b>	<b>CO<sub>2</sub> eq</b>	<b>Fuente</b>
<b>Lagos prístinos MX</b>	843±591 μg L <sup>-1</sup> promedio	579±356 μg L <sup>-1</sup> promedio				(Oseguera, L y Alcocer, 2015)
<b>Lagos impactados MX</b>	3454±2021 μg L <sup>-1</sup>	2919±1825 μg L <sup>-1</sup>				
<b>Este estudio</b>				58,76 mg L <sup>-1</sup> promedio	4,90 mmol/kg	Este estudio
<b>Lago Alchichica MX</b>		1,0 ± 0,7 mg L <sup>-1</sup>				(Alcocer, 2007)
<b>Lago Albufera des Grau España</b>			14,5 mg L <sup>-1</sup>			(Obrador, Biel & Pretus, Joan Lluís, 2013)
<b>Lago Monoun</b>				338 mg L <sup>-1</sup>		(Yoshida et al., 2017)
<b>Lago Nyos -200 m</b>			60 mg L <sup>-1</sup>			
<b>Lago Nyos -99 m</b>					92,50 mmol/kg	(Evans et al., 1994)
<b>SEDIMENTO</b>						
		<b>COT</b>		<b>CT</b>		
<b>Este estudio</b>				12,76 %		
<b>Lago Esthwaite Inglaterra</b>				13 %		(Brunskill, 1971)
<b>Lago Mendota. Wisconsin EEUU.</b>				10 %		
<b>Lagos de Montebello Chiapas. MEX.</b>				9,4 %		(Alcocer, 2016)
<b>SUELO</b>						
<b>Este estudio</b>				11,88 %	1453 (t/ha)	
<b>Para suelos histosoles</b>					1170 (t/ha)	(Lal, 2004)

Cuadro 11. Carbono almacenado en suelo y sedimento con su equivalente en CO<sub>2</sub>

<b>Lugar Ecosistema</b>	<b>Carbono Almacenado MgC ha<sup>-1</sup></b>	<b>MgCO<sub>2</sub>-eq ha<sup>-1</sup></b>	
<b>Lago de Coatepeque Suelo (32 cm)</b>	395,84	1452,73	
<b>Lago de Coatepeque Suelo (2 cm)</b>	23,76	87,20	
<b>Lago de Coatepeque Sedimento (15 cm, 15 m prof.)</b>	191,00	700,97	
<b>Carbono en la cuenca</b>	<b>MgC</b>	<b>MgCO<sub>2</sub>-eq</b>	<b>GtCO<sub>2</sub>-eq</b>
<b>En suelo (32 cm)</b>	3562560,00	13074595,20	<b>0,013075</b>
<b>En sedimento (15 cm, 15 m prof.)</b>	484242,00	1777168,14	<b>0,001777</b>
<b>En agua</b>	110000,00	400000,00	<b>0,000400</b>
<b>Total carbono almacenado en la cuenca (Suelo + Sedimento + Agua)</b>	4156802,00	15251763,34	<b>0,015252</b>

Al comparar los valores de carbono obtenidos en este estudio, con otros reportados en la literatura científica y en diferentes regiones, son concordantes en las matrices estudiadas, agua, suelo y sedimento (Cabassi et al., 2019). En agua, el carbono contenido en el Lago de Coatepeque, es inferior en una orden de magnitud, al obtenido en lagos que han registrado erupciones límnicas como el lago Nyoos, además de registrar homogenización del carbono en todo el cuerpo de agua del Lago de Coatepeque, con muy baja probabilidad que se acumule carbono en lo profundo del lago y con ello disminuyendo la probabilidad de erupción límnic en el Lago de Coatepeque. Los valores de carbono en suelo y sedimentos también son similares a los encontrados en otras regiones.

#### 4. CONCLUSION

En esta investigación se evaluó la variabilidad espacial y temporal de carbono y su concentración equivalente de CO<sub>2</sub> en la columna de agua, sedimentos y suelo del Lago de Coatepeque. La mayor reserva de carbono se registró en suelo de la ribera del lago (3562560,00 MgC), siguiendo sedimento depositado (484242,00 MgC) y agua (110000,00 MgC). El total de carbono almacenado en toda la cuenca del Lago de Coatepeque (Suelo + Sedimento + Agua) fue de 4156802,00 MgC, correspondiéndole una concentración de dióxido de carbono equivalente de 0,015252 GtCO<sub>2</sub>-eq, estos valores son congruentes con el aporte de carbono a escala global reportado en la literatura científica, Las concentraciones de carbono obtenidas en el Lago de Coatepeque, están distribuidas uniformemente en todo el cuerpo de agua, adicionalmente las concentraciones de carbono obtenidas en este estudio, son inferiores a los encontrados en el lago Monoun en Africa, por lo que

es poco probable que ocurra una erupción límnic. No se encontró diferencia significativa en la concentración de carbono en sedimentos (12,76 % en peso) con muestras de suelo (12,37% en peso), en sedimentos las concentraciones de carbono total no fueron diferentes a los encontrados antes, durante y después del cambio de coloración turquesa en el Lago de Coatepeque.

## 5. RECOMENDACIONES

- Continuar investigando el comportamiento de carbono en suelos de la cuenca del Lago de Coatepeque y sedimentos depositados a mayor profundidad en periodos más extensos. Evaluar las concentraciones de isotopos estables de carbono ( $^{13}\text{C}$ ) y ( $^{12}\text{C}$ ), oxígeno ( $^{18}\text{O}$ ), y deuterio ( $^2\text{H}$ ), en aguas subterráneas que entran y salen del Lago de Coatepeque, para relacionar aportes del campo hidrotermal subyacente, el balance de masa del carbono y comprender diversas características hidrológicas-geológicas pasadas.
- Monitorear gases de efecto invernadero dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano  $\text{NH}_4$  y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) en el cuerpo de agua, pozos y fumarolas, para evaluar otros peligros que pueden afectar a la población que habita en las riberas del lago.

## 6. AGRADECIMIENTOS

A todo el personal de la Fundación Coatepeque, por su apoyo logístico para realizar este trabajo. Al personal técnico del laboratorio del Departamento de Química Agrícola, de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de El Salvador, por su contribucion en la aplicación de la tecnica para medicion de carbono. A las autoridades de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática de la Universidad de El Salvador, por su apoyo administrativo para realziar esta investigacion. Al personal del Laboratorio de Toxinas (LABTOX-UES) por su apoyo con equipo instrumental.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Alcocer, J. et. al. (2007). Carbono en ecosistemas acuáticos de México. In C. Hernandez, b. y G (Ed.), *Carbono en ecosistemas acuáticos de México* (1st ed., Issue January 2007, p. 508). <https://doi.org/10.13140/2.1.4413.7927>
- Alcocer, J. et. al. (2016). Contenido de carbono elemental en sedimentos lacustres de unconjunto de lagos tropicales con distinto estado trofico. In *Estado actual dEl conocimiEnto dEl ciclo dEl carbono y sus intEraccionEs En méxico* (pp. 357–365).
- Analytik Jena AG. (2020). *Manual de Usuario multi N/C 3100*.
- Beaver, B., Beaver, R., & Mendenhall, W. (2010). Introducción a la probabilidad y estadística. In *Cengage Learning*.
- Bengtsson, L., Herschy, R. W., & Fairbridge, R. W. (2012). *Encyclopedia of Lakes and Reservoirs (Encyclopedia of Earth Sciences Series)*. <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-4410-6>
- Brunskill, G. et. a. (1971). Chemistry of Surface Sediments of Sixteen Lakes in the Experimental Lakes Area. Northwestern Ontario'. *Journal Fisheries Research Board of Canada*, 28(2). [www.nrcresearchpress.com](http://www.nrcresearchpress.com)
- Cabassi, J., Capecciacci, F., Magi, F., Vaselli, O., Tassi, F., Montalvo, F., Esquivel, I., Grassa, F., & Caprai, A. (2019). Water and dissolved gas geochemistry at Coatepeque, Ilopango and Chanmico volcanic lakes (El Salvador, Central America). *Journal of*

- Volcanology and Geothermal Research*, 378, 1–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.04.009>
- Colvin, A., Rose, W. I., Varekamp, J. C., Palma, J. L., Escobar, D., Gutierrez, E., Montalvo, F., & Maclean, A. (2013). Crater lake evolution at Santa Ana Volcano (El Salvador) following the 2005 eruption. *Special Paper of the Geological Society of America*, 498(02), 23–43. [https://doi.org/10.1130/2013.2498\(02\)](https://doi.org/10.1130/2013.2498(02))
- Doménech, X. (2000). *Química Ambiental, el Impacto Ambiental de los Residuos*.
- Evans, W. C., White, L. D., Tuttle, M. L., Michel, R. L., Kling, G. W., & Tanyileke, G. (1994). Six years of change at Lake Nyos, Cameroon, yield clues to the past and cautions for the future. *Geochemical Journal*, 28(3), 139–162.  
<https://doi.org/10.2343/geochemj.28.139>
- Fourqurean, J., & UICN. (2015). Carbono azul: Métodos para evaluar las existencias y los factores de emisión de carbono en manglares, marismas y pastos marinos. *Cronica Ambiental*, 9, 1–186.
- Gerlach, T. (2011). Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide. *Eos*, 92(24), 201–202.  
<https://doi.org/10.1029/2011EO240001>
- Hernández, W., & Jicha, B. (2019). Múltiple colapso sectorial del volcán de San Salvador. In *Investigaciones UTEC* (1a edición, p. 74).
- IPCC. (2022). Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change. In *IPCC AR6 WG III*.  
<https://doi.org/10.1201/9781003264705-7>
- KALFF, J. (2002). LIMNOLOGY Inland Water Ecosystems KALFF, J. (2002). LIMNOLOGY Inland Water Ecosystems. *Journal of the North American Benthological Society*, 21(2), 346–347. <https://doi.org/10.2307/1468422>. *Journal of the North American Benthological Society*, 21(2), 346–347.  
<https://doi.org/10.2307/1468422>
- Kauffman, B., Donato, D., & Adame, M. (2013). Protocolo para la medición, monitoreo y reporte de la estructura, biomasa y reservas de carbono de los manglares. In *Documento de Trabajo 117*. <http://www.cifor.org/library/4386/protocolo-para-la-medicion-monitoreo-y-reporte-de-la-estructura-biomasa-y-reservas-de-carbono-de-los-manglares>
- Kerrick, D. M. (2001). Present and past nonanthropogenic CO<sub>2</sub> degassing from the solid earth. *Reviews of Geophysics*, 39(4), 565–585. <https://doi.org/10.1029/2001RG000105>
- Kosten, S., Roland, F., Da Motta Marques, D. M. L., Van Nes, E. H., Mazzeo, N., Sternberg, L. D. S. L., Scheffer, M., & Cole, J. J. (2010). Climate-dependent CO<sub>2</sub> emissions from lakes. *Global Biogeochemical Cycles*, 24(2), 1–7.  
<https://doi.org/10.1029/2009GB003618>
- Kusakabe, M. (2017a). Lakes Nyos and Monoun Gas Disasters (Cameroon)—Limnic Eruptions Caused by Excessive Accumulation of Magmatic CO<sub>2</sub> in Crater Lakes. *Geochemistry Monograph Series*, 1(1), 1–50.  
<https://doi.org/10.5047/gems.2017.00101.0001>
- Kusakabe, M. (2017b). Lakes Nyos and Monoun Gas Disasters (Cameroon)—Limnic Eruptions Caused by Excessive Accumulation of Magmatic CO<sub>2</sub> in Crater Lakes. *Geochemistry Monograph Series*, 1(1), 1–50.  
<https://doi.org/10.5047/gems.2017.00101.0001>
- Lal, R. (2004). Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma*, 123(1–2), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>
- Macklin, P. A., Gusti Ngurah Agung Suryaputra, I., Maher, D. T., & Santos, I. R. (2018).

- Carbon dioxide dynamics in a lake and a reservoir on a tropical island (Bali, Indonesia). *PLoS ONE*, 13(6). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198678>
- MARN. (2018). *Inventario Nacional de Humedales*.
- MARN. (2020). *Levantamiento batimétrico del lago de Coatepeque*.
- Myrbo, A. (2012). CARBON CYCLE IN LAKES. *Encyclopedia OfLakes and Reservoirs*, 160–163. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4410-6_8)
- Naciones Unidas. (2020). Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2020. In *Onu*.
- Obrador, Biel, & Pretus, Joan Lluís. (2013). Carbon and oxygen metabolism in a densely vegetated lagoon: implications of spatial heterogeneity. *Limnetica*, 32, 321–336. <https://doi.org/10.23818/limn.32.25>
- Oseguera, L y Alcocer, J. (2015). Concentración y distribución vertical del carbono particulado (total y orgánico) en los lagos de Montebello, Chiapas. In *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México* (p. 678 p).
- Ozawa, A., Ueda, A., Fantong, W. Y., Anazawa, K., Yoshida, Y., Kusakabe, M., Ohba, T., Tanyileke, G., & Hell, J. V. (2017). Rate of siderite precipitation in Lake Nyos, Cameroon. *Geological Society Special Publication*, 437(1), 213–222. <https://doi.org/10.1144/SP437.13>
- PREPAC. (2005). *INVENTARIO REGIONAL DE LOS CUERPOS DE AGUA CONTINENTALES DEL ISTMO CENTROAMERICANO*.
- Sigurdsson, H., Devine, J. D., Tchua, F. M., Presser, F. M., Pringle, M. K. W., & Evans, W. C. (1987). Origin of the lethal gas burst from Lake Monoun, Cameroun. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 31(1–2), 1–16. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(87\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0377-0273(87)90002-3)
- SNET. (2009). *Cuerpos de agua continentales de El Salvador*. <http://marefateadyan.nashriyat.ir/node/150>
- Stets, E. G., Striegl, R., Aiken, G., Rosenberry, D., & Winter, T. (2009). Hydrologic support of carbon dioxide flux revealed by whole-lake carbon budgets. *Journal of Geophysical Research*, 114(1), 1–14. <https://doi.org/10.1029/2008JG000783>
- Stocker, T. . (2012). : Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. In *הגנוטע עליון* (Vol. 66, pp. 37–39).
- Tranvik, L. J., Downing, J. A., Cotner, J. B., Loiselle, S. A., Striegl, R. G., Ballatore, T. J., Dillon, P., Finlay, K., Fortino, K., Knoll, L. B., Kortelainen, P. L., Kutser, T., Larsen, S., Laurion, I., Leech, D. M., Leigh McCallister, S., McKnight, D. M., Melack, J. M., Overholt, E., ... Weyhenmeyer, G. A. (2009). Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate. *Limnology and Oceanography*, 54(6 PART 2), 2298–2314. [https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6\\_part\\_2.2298](https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2298)
- Yoshida, Y., Kusakabe, M., Issa, Ohba, T., Tanyileke, G., & Hell, J. V. (2017). Decreasing capability of the degassing systems at lakes Nyos and Monoun (Cameroon): A new gas removal system applied to Lake Monoun to prevent a future limnic eruption. *Geological Society Special Publication*, 437(1), 205–212. <https://doi.org/10.1144/SP437.3>
- Zhang, Y., & Kling, G. W. (2006). Dynamics of Lake Eruptions and Possible Ocean Eruptions. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34(1), 293–324. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125001>