

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSGRADO Y EDUCACIÓN CONTINUA
MAESTRIA EN EVALUACIÓN DE PELIGROSIDADES
NATURALES**



“Evaluación de carbono y su equivalente de CO₂ en columna de agua, sedimentos y suelo en el Lago de Coatepeque, El Salvador”

Lic. Oscar Armando Amaya Monterrosa

Tesis

**Presentada como requisito parcial para obtener el grado de:
Maestro en Evaluación de Peligrosidades Naturales**

San Salvador, El Salvador, Centro América, 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

Lic. M. Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

DECANO:

DR. FRANCISCO LARA ASCENCIO

SECRETARIO:

ING. AGR. BALMORE MARTÍNEZ SIERRA

Esta Tesis fue realizada bajo la dirección del Tribunal Evaluador de Tesis indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptado como requisito parcial para la obtención del grado de:

Maestro

En Evaluación de Peligrosidades Naturales

Tribunal Evaluador de Tesis

Dr. Marvin José Núñez Rivas
Presidente del Tribunal Evaluador de Tesis.

Ing. M. Sc. Luis Fernando Castaneda Romero
Secretario del Tribunal Evaluador de Tesis

Lic. M. Sc. Freddy Alexander Carranza Estrada
Vocal del Tribunal Evaluador de Tesis

Ing. M. Sc. Mario Antonio Orellana Núñez
Director de la Escuela de Posgrado y Educación Continua

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar la dinámica espacial y temporal de carbono y su concentración equivalente de CO₂ en ecosistemas acuáticos, 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 en los municipios de Santa Ana, El Congo e Izalco, 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 km². Se evaluó la reserva de carbono en agua, sedimento depositado y suelo para generar la línea base de carbono total del Lago de Coatepeque como un dato de referencia para futuras investigaciones sobre tendencias de carbono. Se recolectaron 216 muestras para análisis de carbono, 61 fueron de agua, 56 de sedimentos depositados a 15 m de profundidad y 86 de suelo extraídos de la ribera del lago; se midieron parámetros de temperatura, pH, conductividad y transparencia en el espejo de agua. Los datos se analizaron en el programa RStudio versión 3.6.0 mediante análisis de varianza para identificar diferencias entre meses, profundidades en estratos del lago y mediante correlaciones de Pearson para evaluar la relación entre el carbono total con las variables fisicoquímicas. Se utilizó el método estadístico de análisis de varianza de un factor, para contrastar los valores de carbono total entre grupos agua, sedimentos y suelo. La mayor concentración de carbono total en agua fue de 61,61 ppm (mg L⁻¹), la concentración de carbono total fue homogénea en las 3 profundidades muestreadas (1, 10 y 20 metros). No se encontró diferencia significativa en la concentración de carbono en sedimentos superficiales depositados a 15 m de profundidad con muestras de suelos recolectadas en la cuenca. 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 MgCO₂-eq en todo el cuerpo de agua. El carbono almacenado en suelo de la rivera del lago fue de 395,84 MgC ha⁻¹ con una concentración equivalente de dióxido de carbono de 1452,73 MgCO₂-eq ha⁻¹. En sedimento el carbono almacenado fue 191,00 MgC ha⁻¹ con concentración equivalente de dióxido de carbono de 700,97 MgCO₂-eq ha⁻¹. 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 MgCO₂-eq (0.015252 GtCO₂-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, CO₂-eq, lagos volcánicos, erupciones límnicas.

SUMMARY

With the objective of evaluating the spatial and temporal dynamics of carbon and its equivalent concentration of CO₂ in aquatic ecosystems, 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 in the municipalities of Santa Ana, El Congo and Izalco, 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 km². The carbon stock in water, deposited sediment and soil was evaluated to generate the total carbon baseline of Lake Coatepeque as a reference data for future research on carbon trends. 216 samples were collected for carbon analysis, 61 were from water, 56 from sediments deposited at a depth of 15 m and 86 from soil extracted from the shore of the lake; Parameters of pH temperature, conductivity and transparency in the water mirror were measured. The data was analyzed in the RStudio version 3.6.0 program using analysis of variance to identify differences between months, depths in lake strata, and Pearson correlations to evaluate the relationship between total carbon and physicochemical variables. The statistical method of analysis of variance of one factor was used to contrast the total carbon values between water, sediment and soil groups. The highest concentration of total carbon in water was 61.61 ppm (mg L⁻¹), the concentration of total carbon was homogeneous in the 3 depths sampled (1, 10 and 20 meters). No significant difference was found in the concentration of carbon in surface sediments deposited at a depth of 15 m with soil samples collected in the basin. 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 MgCO₂-eq in the entire body of water. The carbon stored in the lake shore soil was 395.84 MgC ha⁻¹, corresponding to a carbon dioxide equivalent concentration of 1452.73 MgCO₂-eq ha⁻¹. In sediment, the carbon stored was 191 MgC ha⁻¹ with a carbon dioxide equivalent concentration of 700.97 MgCO₂-eq ha⁻¹. The total carbon stored (water + sediment + soil) in the Lake Coatepeque basin was 4156802.00 MgC and its carbon dioxide equivalent concentration was 15251763.34 MgCO₂-eq (0.015252 GtCO₂-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 happen in Lake Coatepeque.

Keywords: Total carbon, Lake Coatepeque, CO₂-eq, volcanic lakes, limnic eruptions.

AGRADECIMIENTOS

Al comité: Marvin J. Núñez, Fernando Castaneda y Freddy Carranza por su disposición y valiosos aportes al evaluar esta tesis.

Especialmente a mi familia.

ÍNDICE GENERAL

	Página.
1. INTRODUCCION	1
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Los Lagos	2
2.2 Clasificación de lagos según su función hidrológica	2
2.3 Carbono en lagos	3
2.4 Composición química del agua continental	4
2.5 Erupciones límnicas	5
2.6 Características generales del Lago de Coatepeque	7
3. MATERIALES Y MÉTODOS	10
3.1 Ubicación del área de estudio	10
3.2 Fase de campo	11
3.2.1 Metodología de muestreo en agua	12
3.2.2 Batimetría	12
3.2.3 Coloracion turquesa	12
3.2.4 Metodología de muestreo en suelo	13
3.2.5 Metodología de muestreo en sedimento	14
3.3 Análisis de Carbono Total CT	15
3.4 Transparencia del agua	15
3.5 Análisis estadístico	15
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	17
4.1 Variación temporal del contenido de Carbono total en Agua	17
4.1.1 Variación del contenido de Carbono total en perfil vertical de la columna de agua	18
4.1.2 Variación espacial del contenido de Carbono total en Agua	20
4.1.3 Cálculo del contenido de carbono en el cuerpo de agua del Lago de Coatepeque	21
4.1.4 Correlación entre variables	21
4.1.5 Relación Carbono Total – Temperatura	22

4.1.6 Relación Carbono Total – Transparencia	23
4.1.7 Relación Carbono Total – pH	24
4.2 Variación espacial del contenido de Carbono total en Suelo	25
4.2.1 Cálculo de la reserva de carbono en suelo de la cuenca Lago de Coatepeque	27
4.2.2 Variación vertical del contenido de carbono total en suelo	28
4.3 Variación temporal del contenido de Carbono total en Sedimento depositado	30
4.3.1 Variación espacial del contenido de carbono en sedimento depositado	32
4.3.2 Cálculo de la reserva de carbono en sedimento depositado a 15 m de profundidad en el Lago de Coatepeque	34
4.4 Variación temporal del contenido de Carbono total en sedimento depositado antes durante y después de la coloración turquesa del agua	35
4.5 Variabilidad de carbono total dentro de cada grupo y prueba de homogeneidad	37
4.5.1 Puntos homogéneos en agua, por profundidad	37
4.5.2 Puntos homogéneos en agua, variación espacial	39
4.5.3 Puntos homogéneos en agua, variación temporal	41
4.5.4 Puntos homogéneos en suelo, variación espacial	43
4.5.5 Análisis de Variancia en Núcleo de suelo	45
4.5.6 Puntos homogéneos en Sedimento del lago, variación espacial	46
4.5.7 Puntos homogéneos en sedimento, variación temporal	48
4.5.8 Puntos homogéneos en sedimento, variación en cambio de coloración Turquesa	50
4.5.9 Comparación con otros estudios	52
5. CONCLUSIONES	55
6. RECOMENDACIONES	56
7. BIBLIOGRAFÍA	57
8. ANEXOS	60

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación hidrológica de los lagos	2
Cuadro 2. Características morfométricas e hidrológicas del Lago de Coatepeque	8
Cuadro 3. Concentraciones de carbono y parámetros fisicoquímicos en agua por mes	17
Cuadro 4. Concentraciones de carbono en perfil vertical a 1, 10 y 20 m de profundidad	19
Cuadro 5. Concentraciones de carbono total en agua por sitio de muestreo	20
Cuadro 6. Concentraciones de carbono total en suelo espacialmente distribuidas	26
Cuadro 7. Varianza y concentraciones promedio de carbono total en sedimento por mes	31
Cuadro 8. Varianza y concentraciones promedio de carbono en sedimentos por puntos de muestreo	33
Cuadro 9. Varianza y valores promedio de carbono total en sedimento, durante el cambio de coloración turquesa	35
Cuadro 10. Varianza y valores promedio de carbono total en perfil vertical para prueba de homogeneidad	37
Cuadro 11. Análisis de varianza de un factor con resultados de carbono en agua en Perfil vertical	38
Cuadro 12. Diferencia Mínima Significativa DMS entre grupos de agua en perfil vertical	38
Cuadro 13. Prueba DMS entre grupos de agua en perfil vertical	39
Cuadro 14. Resultados de la prueba de múltiples rangos para carbono total en perfil vertical	39
Cuadro 15. Varianza y valores promedio de carbono en agua en distintos puntos	39
Cuadro 16. Análisis de varianza de un factor de carbono total en agua distribuidos espacialmente	40
Cuadro 17. DMS para análisis de varianza de un factor entre grupos de agua distribuidos espacialmente	40
Cuadro 18. Prueba DMS entre grupos de agua espacialmente distribuidos	40
Cuadro 19. Resultados prueba de múltiples rangos para carbono total en agua por puntos de muestreo	41
Cuadro 20. Varianza y valores promedio de carbono total en agua por mes	41

Cuadro 21. Análisis de varianza de un factor en agua en distintos tiempos	41
Cuadro 22. DMS para análisis de varianza de un factor entre grupos de agua para distintos tiempos	42
Cuadro 23. Resultados de la prueba de múltiples rangos para carbono total en agua a distintos tiempos	42
Cuadro 24. Resultados de la prueba de múltiples rangos para carbono total en agua a distintos tiempos	43
Cuadro 25. Varianza y valores promedio de carbono total en suelo en diferentes sitios	43
Cuadro 26. Análisis de varianza de un factor de carbono total en suelo en distintos sitios	43
Cuadro 27. DMS para análisis de varianza de un factor entre grupos de suelo distribuidos espacialmente	44
Cuadro 28. Resultados prueba de múltiples rangos para carbono total en suelo por sitios	44
Cuadro 29. Grupos homogéneos de carbono total en suelo por sitio	45
Cuadro 30. Análisis de varianza de un factor en núcleo de suelo	45
Cuadro 31. Varianza y concentraciones promedio de carbono total en sedimento en distintos puntos	46
Cuadro 32. Análisis de varianza de un factor en sedimento en distintos puntos	46
Cuadro 33. Valores r, t, y DMS para análisis de varianza de un factor entre grupos de sedimentos distribuidos espacialmente	46
Cuadro 34. Prueba DMS entre grupos de sedimento a 15 m de profundidad	47
Cuadro 35. Resultados prueba de múltiples rangos para carbono total en sedimento en distintos puntos	47
Cuadro 36. Varianza y concentraciones promedio de carbono total en sedimento por mes	48
Cuadro 37. Análisis de varianza de un factor en sedimento en distintos tiempos	48
Cuadro 38. DMS para análisis de varianza de un factor entre grupos de sedimento en distintos puntos	49
Cuadro 39. Prueba de DMS entre grupos de sedimento a 15 m de profundidad	49

Cuadro 40. Resultados prueba de múltiples rangos para carbono total en sedimento en distintos puntos	50
Cuadro 41. Varianza y valores promedio de carbono total en sedimento, durante cambio de coloración turquesa	50
Cuadro 42. Análisis de varianza de un factor en sedimento durante cambio de coloración	51
Cuadro 43. DMS para análisis de varianza de un factor entre grupos de sedimento distribuidos espacialmente durante cambio de coloración turquesa	51
Cuadro 44. Prueba de DMS entre grupos de sedimento a 15 m de profundidad durante cambio de coloración turquesa	52
Cuadro 45. Grupos homogéneos para carbono total en sedimento durante cambio de coloración turquesa	52
Cuadro 46. Comparación de concentraciones de carbono en agua, sedimentos y suelo obtenidos en este estudio con otros lagos	52
Cuadro 47. Carbono total almacenado en suelo y su equivalente en CO ₂	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Diagrama de los principales procesos del ciclo del carbono en lagos	4
Fig. 2 Depósito de fluido sublacustre	6
Fig. 3: Área de estudio, Lago de Coatepeque	10
Fig. 4. Mapa de puntos de muestreo en agua, sedimentos depositados y suelo	11
Fig.5 Mapa batimétrico del Lago de Coatepeque	13
Fig. 6. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables en agua	22
Fig. 7. Mapa ubicación de sitios de muestreo de suelo para medida de carbono en la cuenca	26
Fig. 8. Mapa ubicación puntos de muestreo de sedimento depositado a 15 m de Profundidad	31
Fig. 9. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables, correlación significativa e inversa con pH, T y transparencia	37

ÍNDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1. Distribución de la concentración de carbono total en agua contra tiempo, en el periodo investigado	18
Gráfico 2. Distribución de la concentración de carbono contra profundidad	19
Gráfico 3. Distribución espacial de carbono en agua en ppm (mgL ⁻¹) por puntos de muestreo, seleccionados espacialmente en el Lago de Coatepeque	20
Gráfico 4. Correlación inversa entre concentración de carbono total y temperatura, para muestras de agua en perfil vertical	23
Gráfico 5. Correlación inversa entre carbono total y transparencia, para muestras de agua recolectadas en perfil vertical	24
Gráfico 6. Correlación inversa entre carbono total y pH, para muestras de agua recolectadas en perfil vertical	25
Gráfico 7. Distribución de la concentración de carbono en suelo (% en peso) por sitios de muestreo	27
Gráfico 8. Variación de Carbono en núcleo de suelo de 32 cm de longitud	28
Gráfico 9. Concentración de carbono en (%) contra profundidad, para un núcleo del suelo	29
Gráfico 10. Distribución de la concentración de carbono en sedimento por mes	32
Gráfico 11. Distribución de la concentración de carbono (% en peso) en sedimento depositado contra puntos de muestreo	34
Gráfico 12. Distribución de carbono total por periodos de coloración turquesa	36

ÍNDICE DE ANEXOS

A-1. Matriz de correlación de variables, empleando e programa RStudio	61
A-2. Procedimiento Químico	61
A- 3. Mapa de suelos de El Salvador	62
A-4. Base de datos contenido de carbono en sedimentos depositados del Lago de Coatepeque	63
A-5. Base de datos contenido de carbono en agua del Lago de Coatepeque	65

A-6. Base de datos contenido de carbono en suelo del Lago de Coatepeque	68
A-7. Base de datos contenido de carbono en núcleo de suelo del Lago de Coatepeque	71
A-8. Actividades de fase de campo para muestras de carbono en agua, suelo y sedimentos	72

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 CO₂ 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 (CO₂) 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 límnica; 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 CO₂-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. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Los Lagos

A escala global, los lagos brindan a las comunidades vecinas una amplia gama de servicios ya sea ambientales o económicos, estos cuerpos de agua almacenan carbono, producen oxígeno y pueden funcionar como reservas ecológicas o ser utilizados para consumo de agua, producción acuícola, energía, o turismo. Los lagos son considerados como grandes masas permanentes de agua cerrados, sin comunicación inmediata al mar, con profundidades mayores a los 10 metros y que pueden tener varios orígenes, sea glacial, represamiento, volcánico, sedimentación, erosión hídrica y eólica. Los lagos pueden ser salados, salobres o dulces (PREPAC, 2005).

2.2 Clasificación de lagos según su función hidrológica.

Los lagos se pueden clasificar según su origen geológico, su estado trófico, régimen térmico o según las condiciones hidrológicas relativas al carácter de las entradas y salidas. La hidrología de un lago está determinada por las entradas y salidas de agua, incluidas las precipitaciones y la evaporación de la superficie del lago, dependiendo del clima y configuración geológica. La mayoría de los lagos tienen desagües, sin embargo, algunos no tienen salida, son cerrados, denominados lagos endorreicos. Algunos lagos son simplemente una parte del sistema de aguas subterráneas, y tanto la entrada como la salida son flujos de agua subterránea, su clasificación hidrológica se presenta en el cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación hidrológica de los lagos.

Entrada	Salida	Tipo de lago	Escenario
Superficial	Ninguna	Terminal	Grandes lagos
Superficial	Superficial	Derrame	Lagos más comunes
Agua subterránea	Superficial	Derrame	Formación de arena aguas abajo
Agua subterránea	Agua subterránea	Cerrado	Sistema de aguas subterráneas

Tomado de (Myrbo, 2012)

Los lagos pueden formarse por actividad volcánica, por disolución en terrenos kársticos, meteóricos y deslizamientos de tierra o formados por el viento. Los lagos volcánicos formados

a partir de la actividad volcánica se pueden encontrar en diversas partes del mundo como Islandia, Italia y Nueva Zelanda, así como en El Salvador (Myrbo, 2012).

Investigaciones han demostrado que los lagos son sitios extremadamente activos para el transporte, la transformación y el almacenamiento de cantidades considerables de carbono recibido del medio terrestre y, por lo tanto, pueden tener un efecto desproporcionado con respecto a su extensión espacial (Tranvik et al., 2009).

2.3 Carbono en lagos

Los lagos procesan una enorme cantidad de carbono, dada su pequeña extensión de área colectiva, secuestrando carbono orgánico e inorgánico en sus sedimentos y emitiendo grandes cantidades de dióxido de carbono y metano a la atmósfera. Los materiales que contienen carbono particulado y disuelto ingresan al lago a través del agua superficial, subterránea y flujo terrestre, liberando CO₂ al agua del lago. La difusión de gases a través de la interfaz aire-agua es relativamente lenta, lo que permite que el agua del lago supere la saturación de CO₂. La evasión de CO₂ y metano (Figura 1) a la atmósfera puede ocurrir tanto por difusión como por ebullición (burbujeo) (Myrbo, 2012).

El ciclo del carbono lacustre involucra interacciones de formas gaseosas, disueltas y sólidas de carbono. Los insumos incluyen carbono derivado de la atmósfera, aguas superficiales, aguas subterráneas, regolito y lecho rocoso [Myrbo, 2012].

Evidencia reciente apunta al papel significativo de los ecosistemas de agua dulce en muchos procesos clave, por ejemplo, la emisión de dióxido de carbono (CO₂) y el almacenamiento de carbono orgánico en sedimentos (Tranvik et al., 2009). Se reconoce la importancia de los ecosistemas acuáticos de agua dulce para el ciclo del carbono global y regional.

Los lagos son fuentes netas de CO₂ atmosférico, también capturan una gran cantidad de carbono orgánico en sus sedimentos. Actualmente la emisión de CO₂ a la atmósfera de los lagos se mantiene principalmente por la mineralización de carbono alóctono, haciendo que la respiración (R) exceda la producción primaria bruta (GPP) resultando en heterotrofia neta del ecosistema

lacustre (Stets et al., 2009). Gran parte del carbono terrestre que entra en aguas continentales se entierra en sedimentos o se emite como CO_2 a la atmósfera.

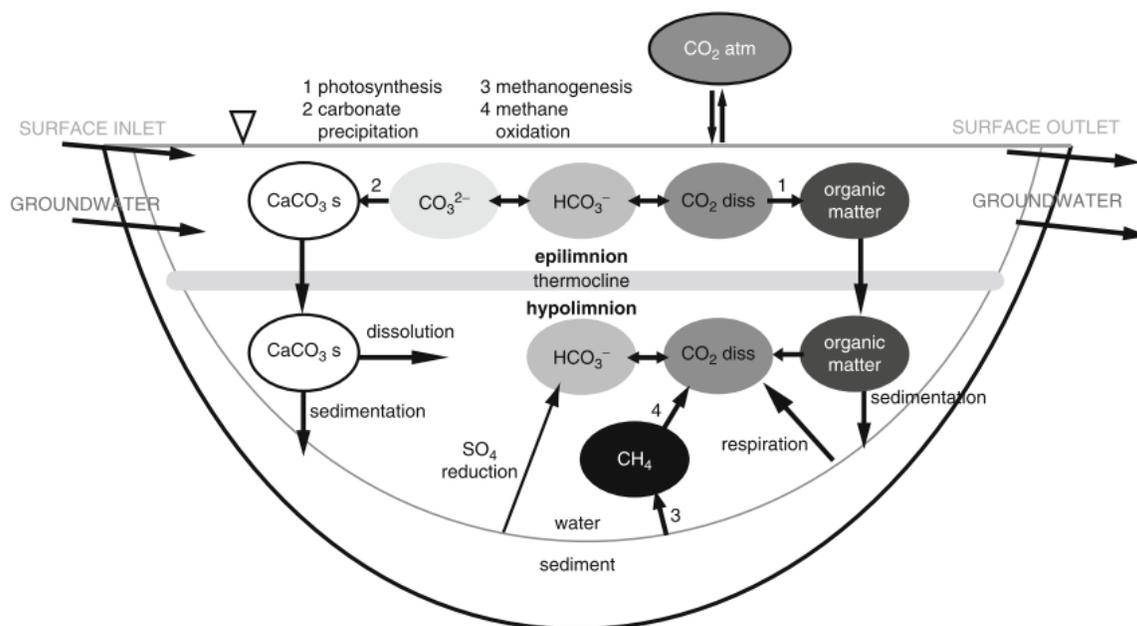


Fig. 1 Diagrama de los principales procesos del ciclo del carbono en lagos. Tomado de Myrbo, A. et al. 2012.

Además, la producción primaria en aguas continentales representa un flujo de carbono sustancial, especialmente en lagos con altas concentraciones de nutrientes que permiten alta productividad, dependiendo del equilibrio entre procesos como la respiración, la producción primaria, la entrada de carbono en las aguas subterráneas y la precipitación de calcita, estos sistemas pueden ser sumideros de carbono o sobresaturarse de CO_2 y actuar como fuentes de CO_2 a la atmósfera. (Kosten et al., 2010).

2.4 Composición química del agua continental

La composición natural del agua continental depende de cuatro factores: i) La presencia de materia orgánica en disolución o en suspensión, ii) la concentración de oxígeno disuelto, iii) la concentración de CO_2 y iv) los procesos químicos que ocurren durante la circulación del agua (Doménech, 2000).

Diferentes procesos físicos, químicos y biológicos tienen lugar en los lagos, el más importante, es el equilibrio hídrico, la calidad del agua en un lago está determinada por las condiciones en la cuenca alta. Al interior del lago, el agua circula y se mezcla por el viento y energía de radiación solar. La mayoría de los lagos tienen un desagüe que ayuda a regular el nivel del agua del lago. Los lagos endorreicos, son muy sensibles a la variación climática y a las actividades humanas dentro de la cuenca alta. Los lagos se caracterizan por su superficie, profundidad y características hidrológicas, balance hídrico, régimen térmico y condiciones de la cuenca hidrográfica (Bengtsson, L., Herschy, R. W., & Fairbridge, 2012).

2.5 Erupciones límnicas

Considerando peligrosidades naturales asociadas a lagos volcánicos sobresalen las erupciones límnicas, las cuales causan explosiones de gas de un lago (Zhang & Kling, 2006), y en ocasiones puede causar desastres en el área circundante. En los lagos Nyos y Monoun en África central, ocurrieron erupciones límnicas de CO₂ gaseoso en la década de los ochentas cobrando pérdidas de vidas humanas (Ozawa et al., 2017).

El concepto "erupción límnic" se emplea para describir la explosión de gas en un lago, el cual ha llamado la atención de los medios de comunicación y la perspectiva de la ciencia de los desastres naturales (Kusakabe, 2017a). Los lagos cratéricos generalmente se ubican en la parte superior de los conductos volcánicos y actúan como trampas para los volátiles magmáticos. Las erupciones límnicas ocurridas en los lagos Nyos y Monoun, resultaron de acumulación excesiva de CO₂ magmático en las capas inferiores de estos lagos, figura 2.

El término "erupción límnic" fue acuñado por J.-C. Sabroux para describir una explosión de gas de un lago. Dado que este tipo de desastre de gas no se había registrado previamente (Sigurdsson et al., 1987), los eventos de los lagos Monoun y Nyos atrajeron una gran atención, no solo de los medios sino también desde la perspectiva de la ciencia de desastres. En ese momento, nadie imaginaba que los lagos hubieran acumulado tanto gas letal y que el gas fuera liberado a la atmósfera sin ningún precursor.

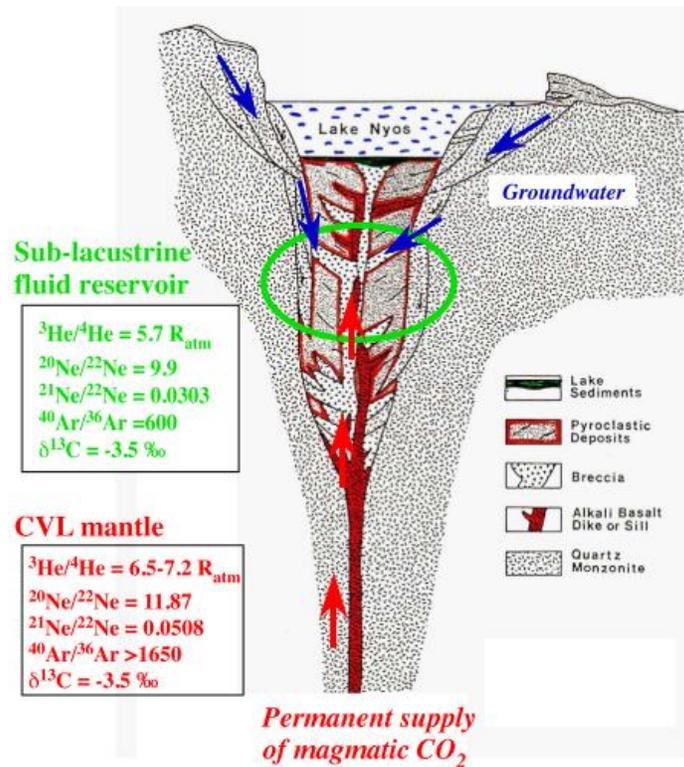


Fig. 2 Depósito de fluido sublacustre (círculo verde). Las flechas azules indican el posible flujo de agua subterránea, las flechas rojas indican un fluido magmático proveniente del magma debajo. Se muestran las proporciones isotópicas de gases nobles y carbono de los reservorios. Tomado de Kusakabe, 2017.

Investigaciones geoquímicas posteriores revelaron que el gas era CO_2 que se originó a partir del magma y se había acumulado pasivamente en la parte profunda de estos lagos. Las características fisicoquímicas de los lagos son únicas y han evolucionado con el tiempo, incluso después de la liberación de gas, debido al suministro continuo de CO_2 magmático. Los volátiles provienen de la profundidad de la tierra y salen a la superficie principalmente por la actividad volcánica. En términos del ciclo global del carbono, la descarga de CO_2 del vulcanismo de los cráteres o los flancos de los volcanes, es el principal contribuyente no antropogénico al CO_2 atmosférico (Kerrick, 2001) (Gerlach, 2011).

La desgasificación pasiva de CO_2 es la descarga de gas derivada de una fuente magmática. El desastre de gas del lago Nyos en 1986 y en 1984 en el lago Monoun, ambos en Camerún, África

central, fueron el resultado de una acumulación excesiva de CO₂ magmático en las capas inferiores de los lagos.

De 714 volcanes en el mundo, 86 albergan lagos. La información sobre los lagos volcánicos se encuentra disponible en la base de datos VOLADA (2013) <https://vhub.org/resources/2822>. En la región de Centroamérica, existen lagos volcánicos ricos en CO₂, por ejemplo, Laguna Hule y Río Cuarto en Costa Rica (Kusakabe, 2017b).

2.6 Características generales del Lago de Coatepeque

El Salvador posee 126 humedales de los cuales sobresale el Lago de Coatepeque ubicado entre los municipios de Santa Ana, El Congo e Izalco, 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, aproximadamente a 50 kilómetros de San Salvador. Tiene una altitud de 737 msnm y una superficie de 25,3 km² (cuadro 2). Su profundidad media es de 115 m (MARN, 2018), es el cuarto cuerpo de agua natural más grande del país. La cuenca en la que se ubica el Lago de Coatepeque es de tipo endorreica, en el cuadro 2 se presentan características morfométricas e hidrológicas, se encuentra en una región volcánica activa desde hace miles de años; en el 2005 el volcán Ilamatepec generó flujos de lava y material piroclástico que llegaron al espejo de agua (Colvin et al., 2013).

La cobertura vegetal del Lago de Coatepeque ha sufrido presión humana, en la cuenca alta se observa mayor cobertura vegetal por el cultivo de café que bordea todo el cráter en donde descansa el cuerpo de agua. Dentro y fuera de las márgenes del lago se encuentran especies como *Potamogeton angustifolium*, *Cyperus* spp., *Hydrilla verticillata* “Lama”, entre otras; por otra parte, en el sector que colinda con el bosque “Las Lajas” (Complejo San Marcelino), existe un relicto de bosque submontano con una abundante diversidad, se observan los tres estratos arbóreo, arbustivo y herbáceo. Especies de gran tamaño presentes en ese bosque son: *Terminalia oblonga* “Volador”, *Trophis racemosa* “Ujusthe macho”, *Enterolobium cyclocarpum* “Conacaste”, *Brosimum terrabanum* “Ojushte”, *Triplaris malaenodendron* “Mulato”, *Cedrela salvadorensis* “Cedro”, *Sapium macrocarpum* “Chilamate”, *Maclura tinctoria* “Mora”, *Lonchocarpus minimiflorus* “Chaperno”, *Styrax argenteus* “Estoraque” y *Cordia alliodora* “Laurel”, (SNET, 2009).

El Lago de Coatepeque ha manifestado diversos fenómenos naturales apreciables a simple vista entre ellos: abundante espuma, proliferación de microalgas nocivas, burbujeo, fétidos olores disminución en nivel del agua. Por ser un lago de origen volcánico se reflexiona sobre la influencia que tiene el volcán de Santa Ana (Ilamatepec) en las manifestaciones físicas, biofísicas, geológicas, químicas, biológicas, y geoquímicas entre otras. Además, la información científica sobre sus características limnológicas es insuficiente para proporcionar respuesta que garantice tranquilidad a sus habitantes.

Cuadro 2. Características morfométricas e hidrológicas del Lago de Coatepeque.

Características	Unidades	Lago de Coatepeque
Origen		volcánico
Elevación de la superficie (espejo de agua)	msnm	737
Área del Lago	km ²	25,3
Profundidad máx.	m	112
Volumen	km ³	1,8
Ubicación		13° 52'' N y 89° 33'' W
Suelo regional		Litotoles
Área de la cuenca	km ²	90
Relación área de la cuenca/área del lago		3,6
Tipo		Cerrado

Los continuos cambios de coloración turquesa ocurridos casi siempre en el mes de agosto durante los años 2012, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 y 2021 hace suponer que es un proceso cíclico no muy conocido; adicionalmente el continuo burbujeo y aparición de espuma en la superficie del espejo de agua genera alarma en la población ante peligros que pudieran acompañar estos fenómenos por la cercanía al volcán de Santa Ana y ausencia de orientación clara por parte de autoridades ambientales.

La cuenca del Lago de Coatepeque no está exenta de peligros biológicos y otros como huracanes, inundaciones, terremotos e incendios forestales que causan desastres y agudizan la inseguridad alimentaria, pérdida de vidas humanas, y degradación de ecosistemas relacionados con el agua; aunado a esto, la crisis climática continúa, las emisiones de gases de efecto invernadero como el CO₂ no disminuyeron en un 7,6% en el 2020. Los países en desarrollo han comenzado a formular planes para fortalecer la resiliencia y la adaptación al cambio climático, vinculados a los objetivos de desarrollo sostenible ODS. Entre las medidas de adaptación al cambio climático propuestas por el IPCC se tiene la captura de carbono en ecosistemas naturales (Naciones Unidas, 2020) (IPCC, 2022), que es una fortaleza de esta tesis.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación del área de estudio

La investigación se desarrolló en el Lago de Coatepeque, cuarto cuerpo de agua más grande del país, y está localizado en la zona occidental de El Salvador (13° 50'07 N, 89° 34,30' O a una altitud de 737 msnm (Fig. 3), 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⁻¹ (<https://es.weatherspark.com/y/12270/Clima-promedio-en-Coatepeque-El-Salvador-durante-todo-el-a%C3%B1o#Figures-WindSpeed>).

Se determinaron concentraciones de carbono total en muestras recolectadas en el espejo de agua, sedimentos depositados a 15 m de profundidad y suelo de la riberas del lago, desde octubre 2020 a junio 2021, período que cubre la transición época lluviosa y seca del país.

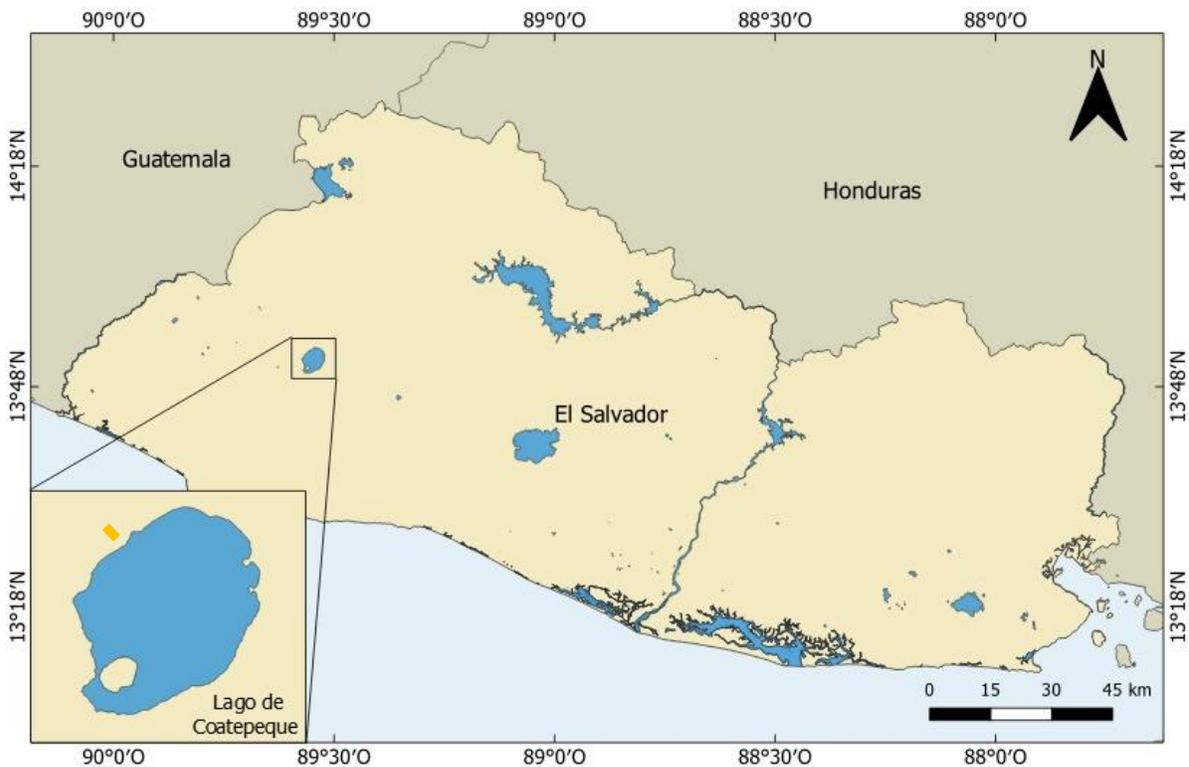


Fig. 3: Área de estudio, Lago de Coatepeque.

3.2 Fase de campo

Desde octubre 2020 a junio 2021, se recolectaron 216 muestras para análisis de carbono total cubriendo el espejo de agua y subcuenca de drenaje del Lago de Coatepeque representadas en la figura 4, distribuidas de la siguiente manera: 61 muestras de agua, 56 de sedimentos depositados a 15 m de profundidad y 86 de suelo extraídas de la ribera del Lago de Coatepeque, se procesaron parámetros relacionados con las propiedades físicas y morfométricas del lago (área de superficie, altitud, profundidad y relación de área de drenaje). 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.

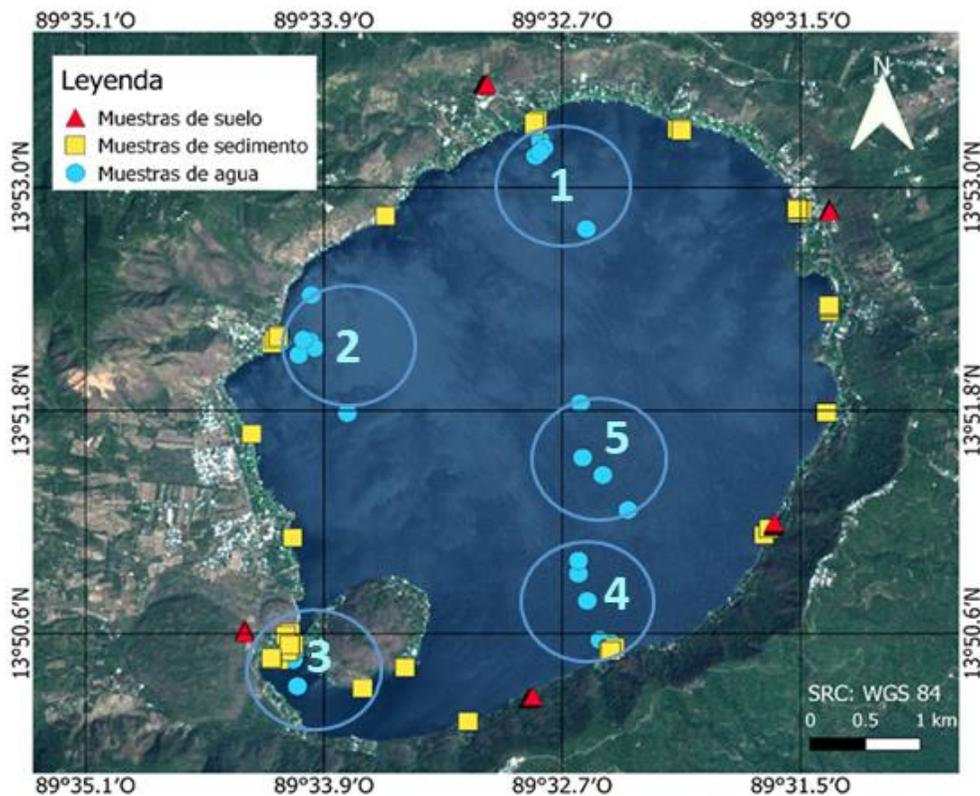


Fig. 4. Mapa de puntos de muestreo en agua (círculos), sedimentos depositados (cuadrados) y suelo (triángulos).

3.2.1 Metodología de muestreo en agua

Se recolectaron muestras de agua en perfil vertical y horizontal utilizando botella Nisking de 10 litros, considerando la batimetría, figura 5. Se registró temperatura, transparencia conductividad y carbono total a profundidades de 1,0; 10,0 y 20,0 m, como se muestra en esquema de la figura 4. Se seleccionaron 5 sitios de muestreo representativos del cuerpo de agua llamados Constitución P1, Castillo del Rey P2, Agua Caliente P3, La Peña P4 y Centro del lago P5, distribuidas equidistantes considerando la batimetría del lago y las de monitoreo de microalgas que mantiene el laboratorio de toxinas de la universidad de El Salvador. Las campañas de monitoreo fueron realizadas con frecuencia mensual durante octubre, noviembre, diciembre 2020, febrero, marzo, abril, mayo y junio 2021, el periodo abarca prácticamente la estación seca, el total de muestras analizadas en agua fueron 61.

El carbono fue convertido a concentración de CO₂-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⁻¹] y el del carbono [12 g mol⁻¹] (Kauffman et al., 2013).

3.2.2 Batimetría

La profundidad máxima del Lago de Coatepeque es 112 m, la parte subacuática del lago presenta taludes inclinados con pendientes fuertes de más de 60° desde la horizontal, al lado Este y Oeste; zona displayada al Norte, y zona de poca profundidad (25m) al Sur de la isla Teopán. Así mismo, se encuentra una zona de poca profundidad (<3m) en la parte central del canal estrecho entre Teopán y la zona circundante al Suroeste del lago, donde se aprecia superficialmente un flujo de lava de ignimbritas y materiales (breccia) volcánicos en forma de flujo y bloques provenientes del volcán de Santa Ana. En la Figura 5 se presenta la batimetría del lago (MARN, 2020).

3.2.3 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 aparecimiento del fenómeno.

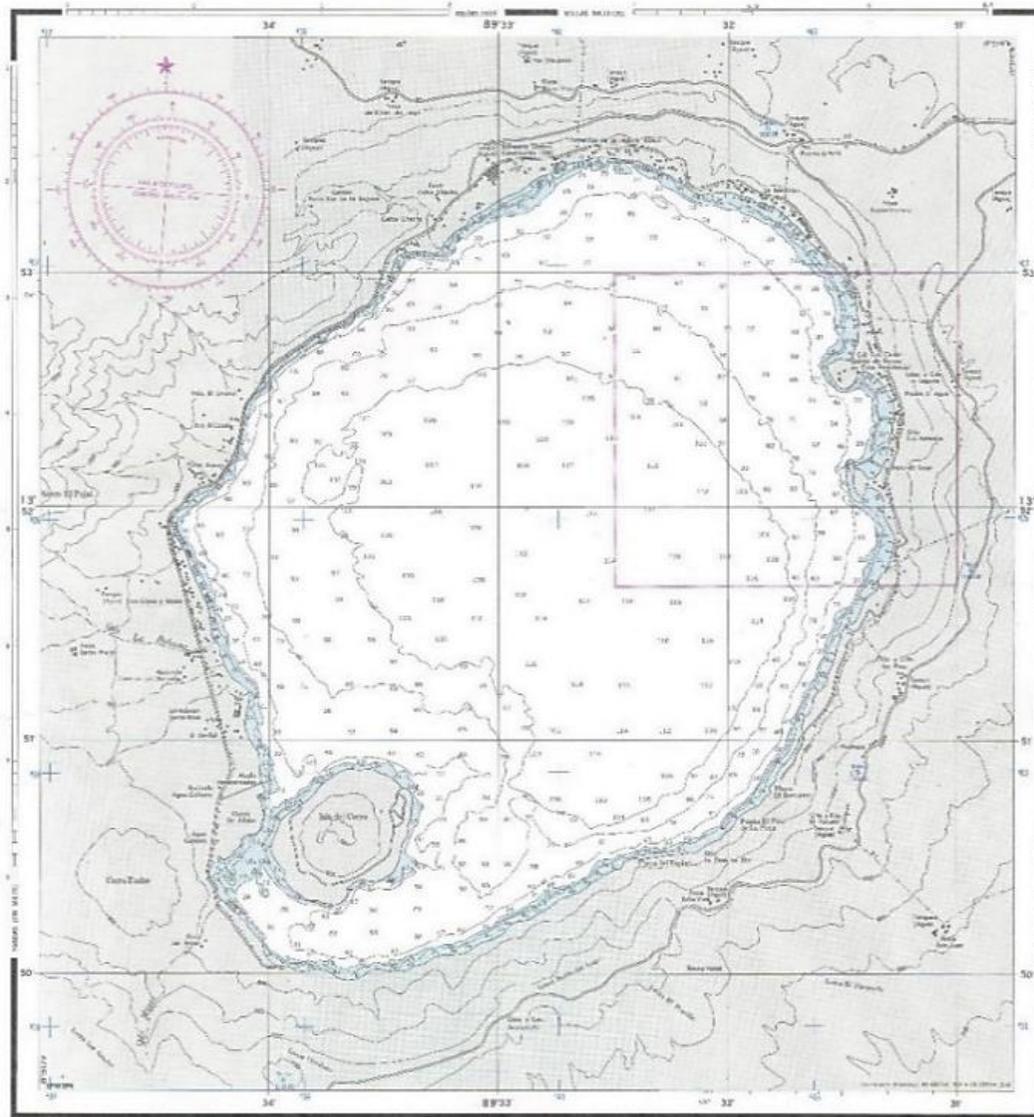


Fig.5 Mapa batimétrico del Lago de Coatepeque.

3.2.4 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 cm³ 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, se consideró el grado de pendiente del terreno y uso de suelo para la extracción de los núcleos.

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 un 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.

3.2.5 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), los puntos de muestreo se presentan en la figura 8.

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, garantizando que fueran estadísticamente representativas para su análisis.

3.3 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.

El gas de medición se enfría en un serpentín de condensación y el agua condensada se separa en el siguiente recipiente de carbono inorgánico total TIC. Después del secado y separación del gas de efecto corrosivo, el gas de medición CO₂ se lleva al detector infrarrojo no dispersivo NDIR. El carbono inorgánico se determina mediante inyección de una alícuota de la muestra en el reactor TIC ácido y la expulsión del CO₂ formado mediante el detector NDIR. La concentración de CO₂ 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)

3.4 Transparencia del agua.

Se determinó la penetración de la luz o transparencia en la columna de agua empleando el disco de Secchi medida como visibilidad en metros, hasta que ya no pueda verse se marca la profundidad en la cuerda.

3.5 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, figura 6.

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. Se organizaron los datos en tablas y diagramas para observar la correlación entre la concentración de carbono en agua, sedimentos y suelo en el Lago de Coatepeque.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 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^{-1}) ocurrida en febrero 2021 y la mínima de 56,39 ppm en octubre 2020, el rango fue de 5,22 ppm. En el cuadro 3, 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, en la figura 6 se muestra la correlación de carbono total con las magnitudes físicas registradas in situ.

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 3. Concentraciones de carbono y parámetros fisicoquímicos en agua por mes.

Año-mes	n	C prom. (ppm)	Var (ppm²)	σ (ppm)	T (°C)	pH	*Trnsp. (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.

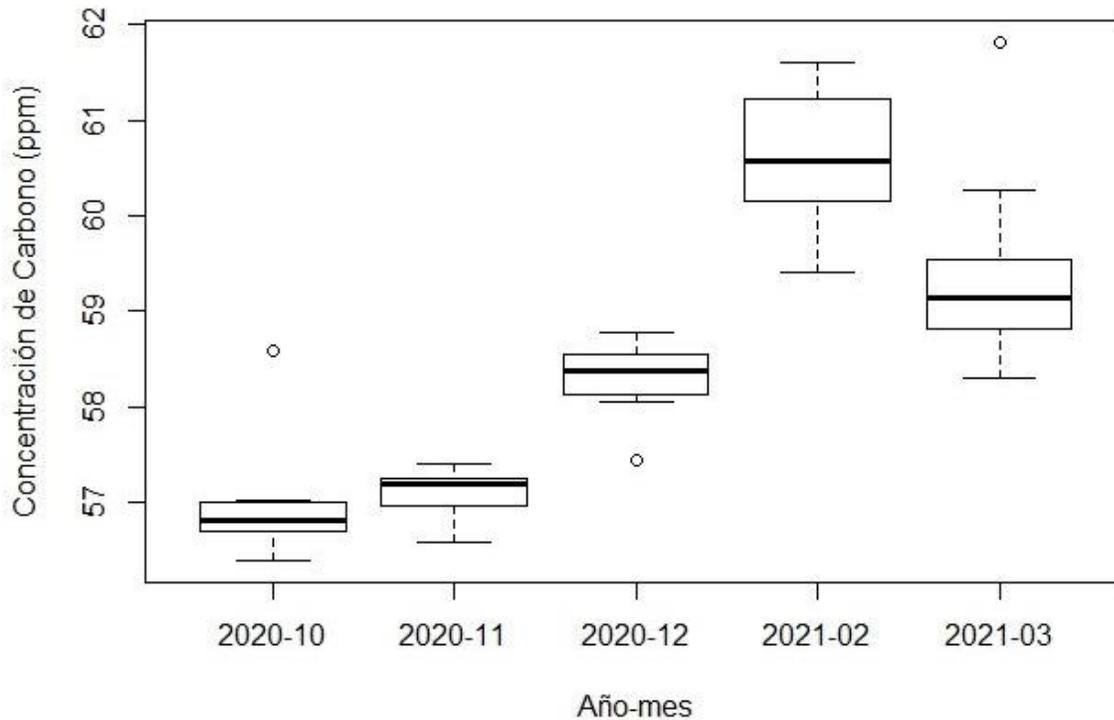


Gráfico 1. Distribución de la concentración de carbono total en agua contra tiempo, en el periodo investigado.

4.1.1 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); 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 4 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 límnic. 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 4. Concentraciones de carbono en agua a 1, 10 y 20 m de profundidad.

Profundidad (m)	n	Carbono promedio ppm	Varianza ppm ²	σ 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.

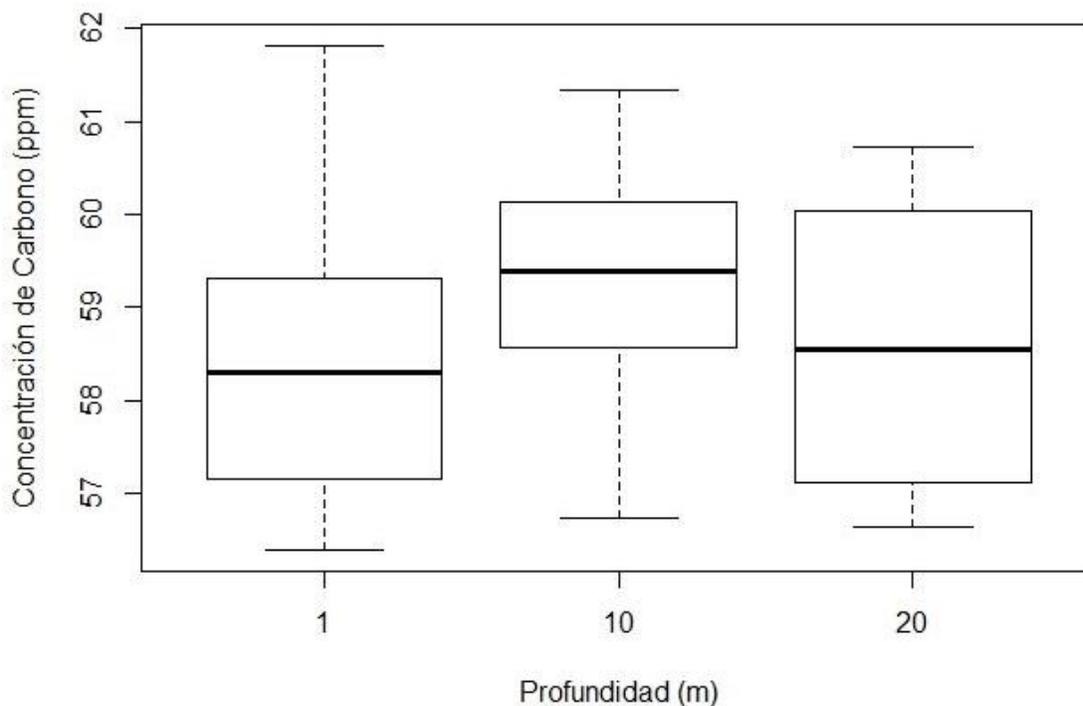


Gráfico 2. Distribución de la concentración de carbono contra profundidad.

4.1.2 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 (figura 4), profundidad (112 m), los demás presentan valores homogéneos cuadro 5, 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 5. Concentraciones de carbono total en agua por sitio de muestreo.

Sitio	n	Carbono promedio (ppm)	Varianza (ppm ²)	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

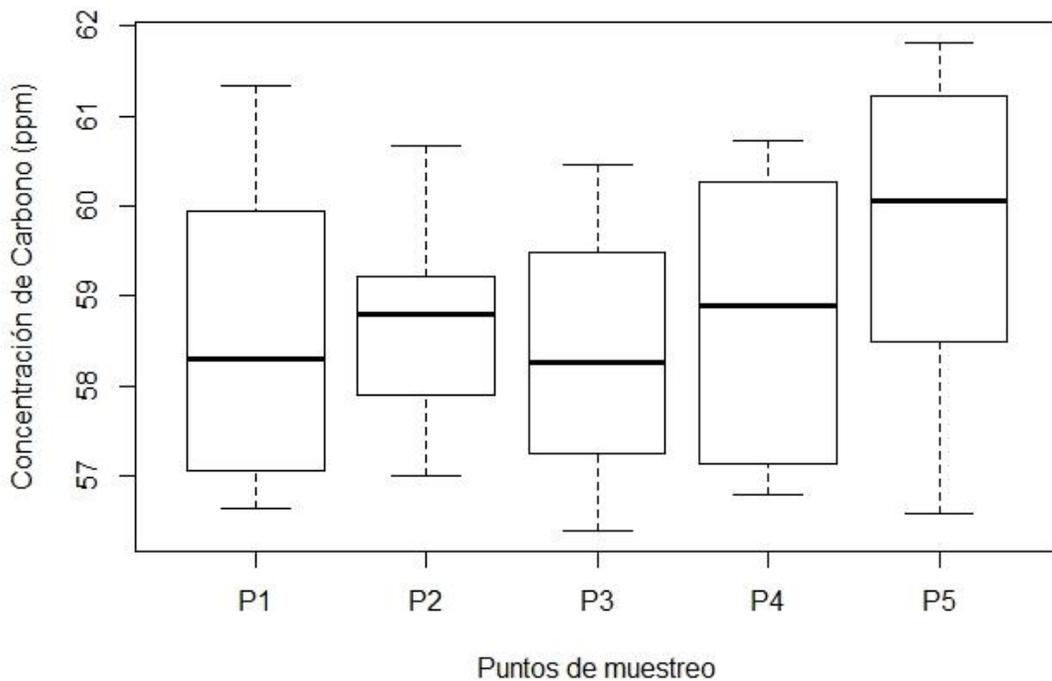


Gráfico 3. Distribución espacial de carbono en agua en ppm (mgL^{-1}) por puntos de muestreo, seleccionados espacialmente en el Lago de Coatepeque.

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

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

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

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

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

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

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

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 g mol^{-1}] y el carbono [12 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 PgC (Tranvik et al., 2009), para el caso del Lago de Coatepeque sería $0,00011 \text{ PgC}$.

4.1.4 Correlación entre variables

Los parámetros temperatura, transparencia, conductividad y pH fueron medidos en agua en todas las estaciones de muestreo para determinar su comportamiento con el carbono del Lago de Coatepeque. 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_2 a la atmosfera.

En la figura 6 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, es decir cuando una de estas variables aumenta manteniendo las demás constantes, la concentración de carbono en agua disminuye. 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.

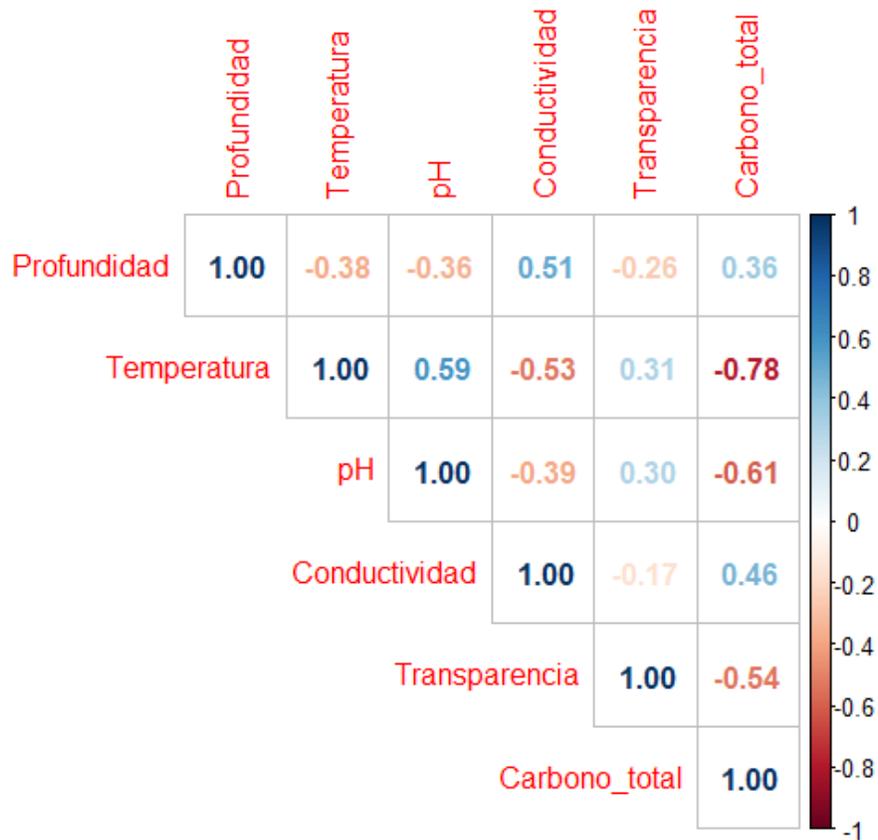


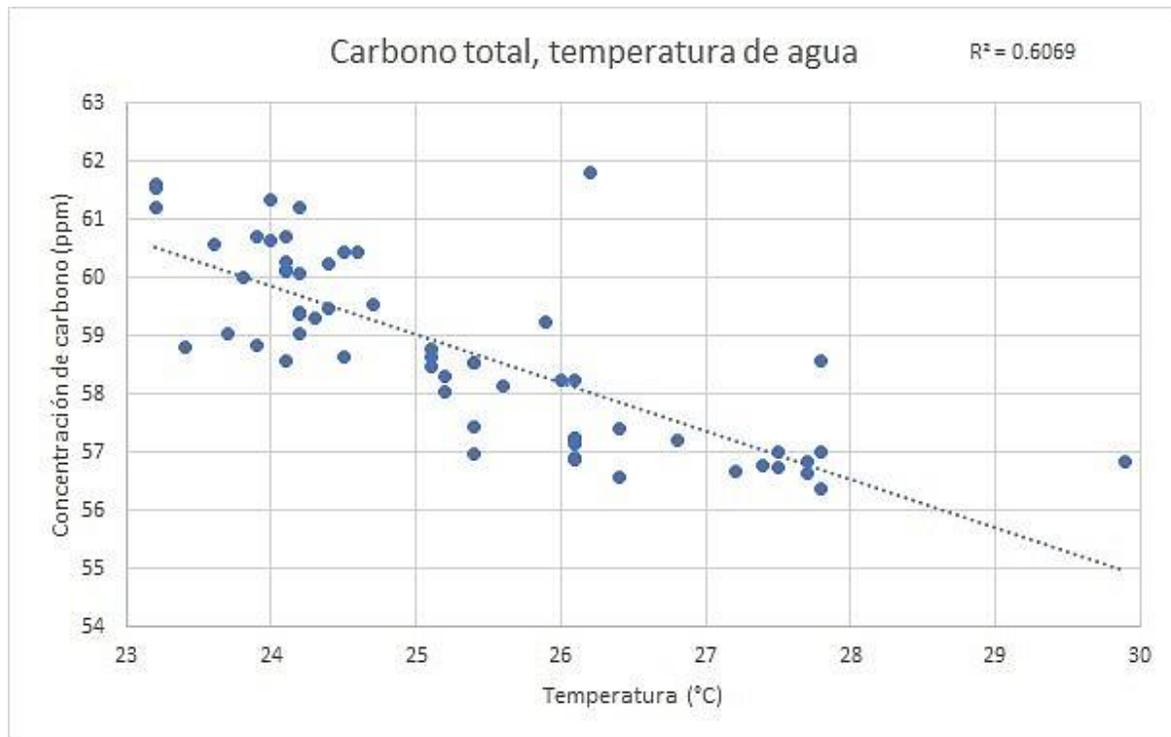
Fig. 6. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables en agua.

4.1.5 Relación Carbono Total – Temperatura

La temperatura promedio de la columna de agua durante el 2020-2021 varió entre $29,9 \pm 1$ y $23,6 \pm 1$ °C ambas obtenidas en el punto 1, con el mes más frío abril, y el más cálido octubre. Se encontró correlación inversa entre concentración de carbono y temperatura, el coeficiente de correlación de Pearson fue -0,78, se muestra el diagrama de dispersión de la concentración de carbono total contra temperatura del agua (Gráfico 4).

El periodo en que se realizó el estudio, en donde hay una transición de la época lluviosa a seca, la concentración de carbono y la temperatura del agua mostraron un comportamiento térmico en la capa superficial analizada (0 a 20 m) con un gradiente de temperatura de 23 a 30 °C, presentó un coeficiente de correlación inversa entre ambas magnitudes, indicando que a medida que la temperatura del agua

del lago incremente en el tiempo habrá menos carbono, que podría afectar procesos químicos y físicos ya sea bióticos o abióticos, también se puede asumir que el carbono funciona como un indicador para el estudio del cambio climático.



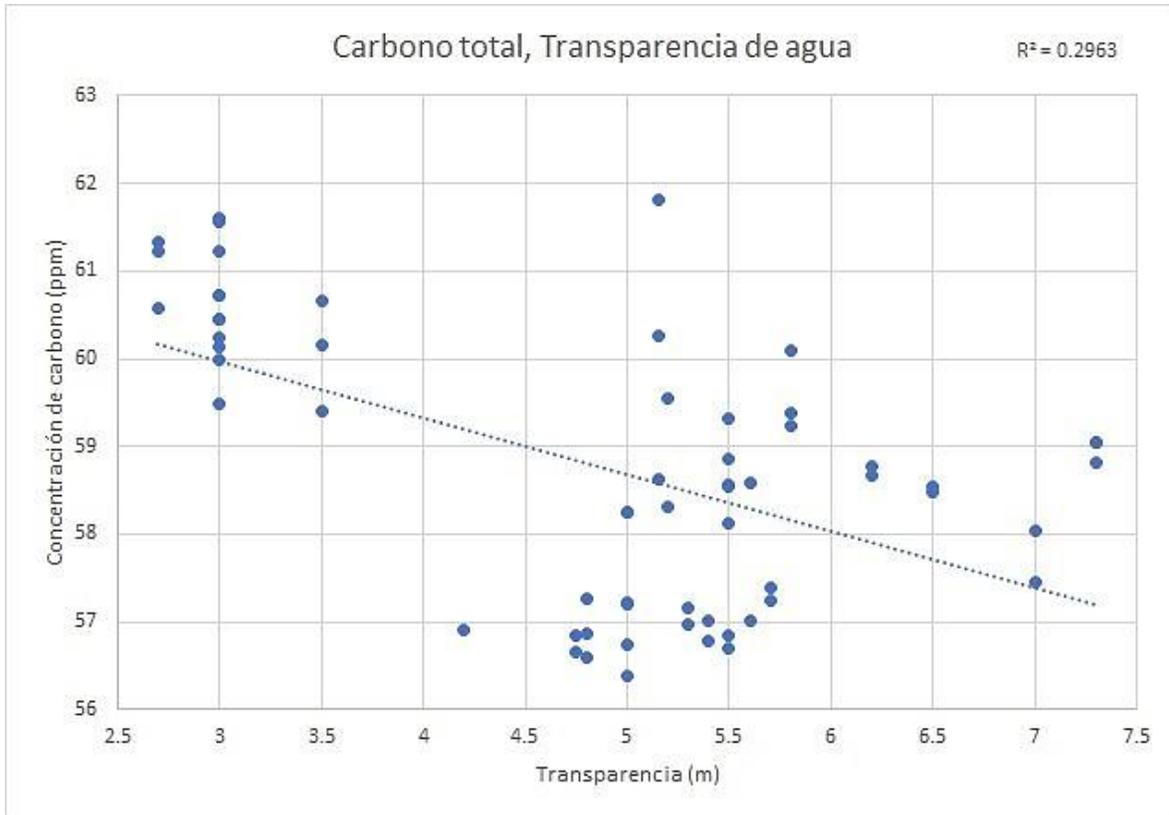


Gráfico 5. Correlación inversa entre carbono total y transparencia, para muestras de agua recolectadas en perfil vertical.

4.1.7 Relación Carbono Total – pH

Las características geoquímicas de la cuenca hacen que el agua del Lago de Coatepeque presenta valores de pH básicos, entre $8,4$ y $7,9 \pm 0,1$ y muy estables a lo largo de la columna de agua y en el tiempo (Gráfico 6), el coeficiente de correlación de Pearson fue -0.61 , indicando relación inversa entre carbono y pH. Este comportamiento es típico de cuerpos de agua dulce que permite regular los cambios de acidez y basicidad (KALFF, 2002).

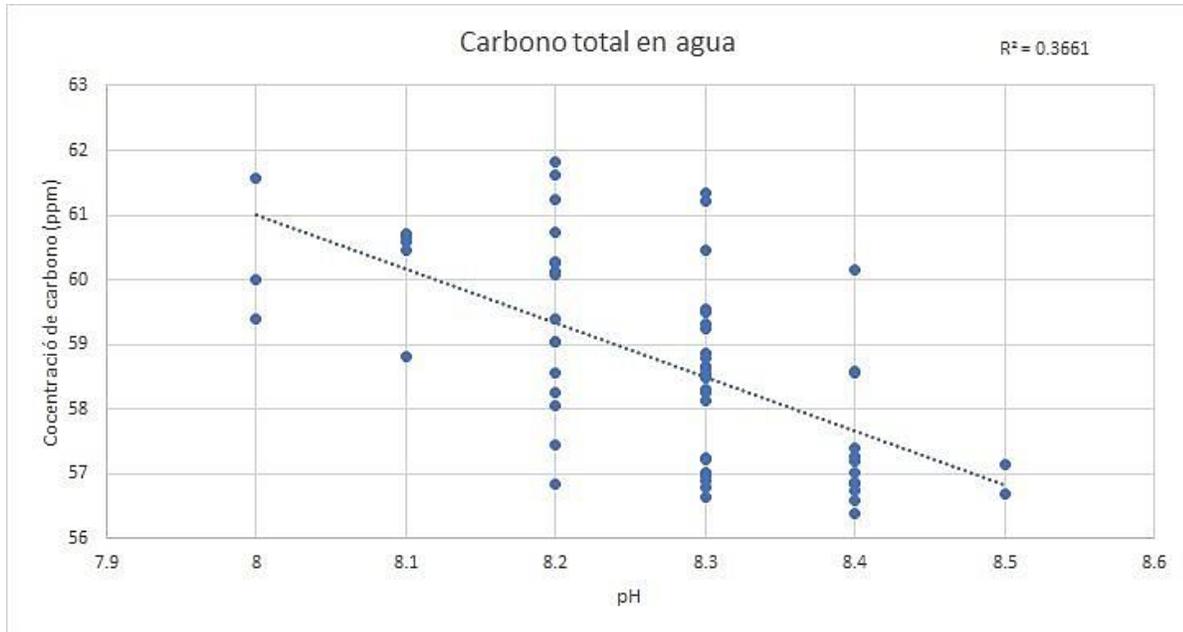


Gráfico 6. Correlación inversa entre carbono total y pH, para muestras de agua recolectadas en perfil vertical.

4.2 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 representados como SL1 La Peña, SL2 Los Infiernillos, SL3 Los Pinos, SL4 Escuela de La Bendición, y SL5 Vuelta de Oro; el sitio con más bosque SL1 presenta mayor concentración de carbono, figura 7.

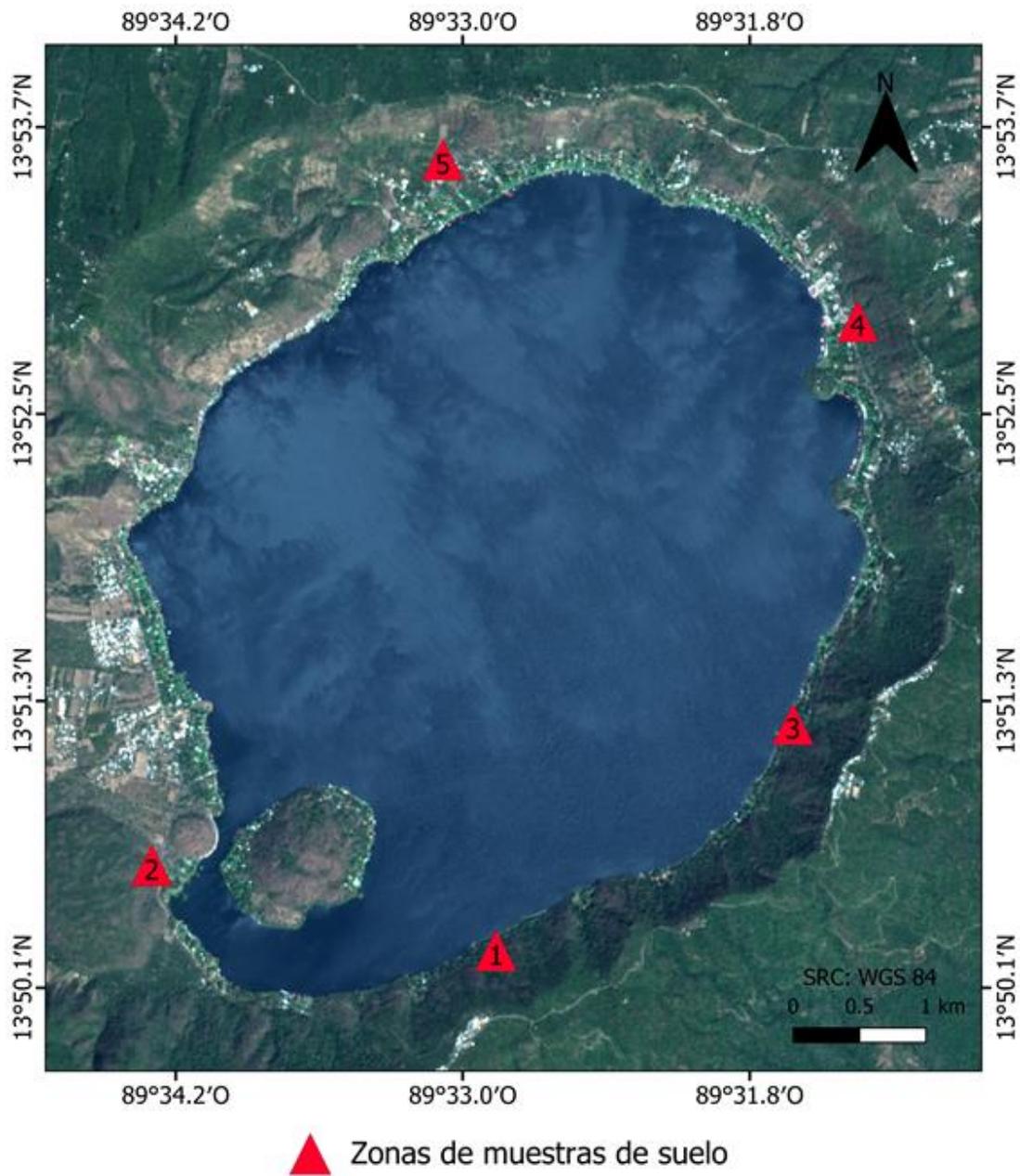


Fig. 7. Mapa ubicación de sitios de muestreo de suelo para medida de carbono en la cuenca.

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

Sitio	n	C prom. (% en peso)	Varianza. (% ²)	σ (%)
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 7), en los diferentes sitios de muestreo. La mayor Concentración de Carbono se observa en el sitio 1 y presenta mayor variabilidad en los resultados.

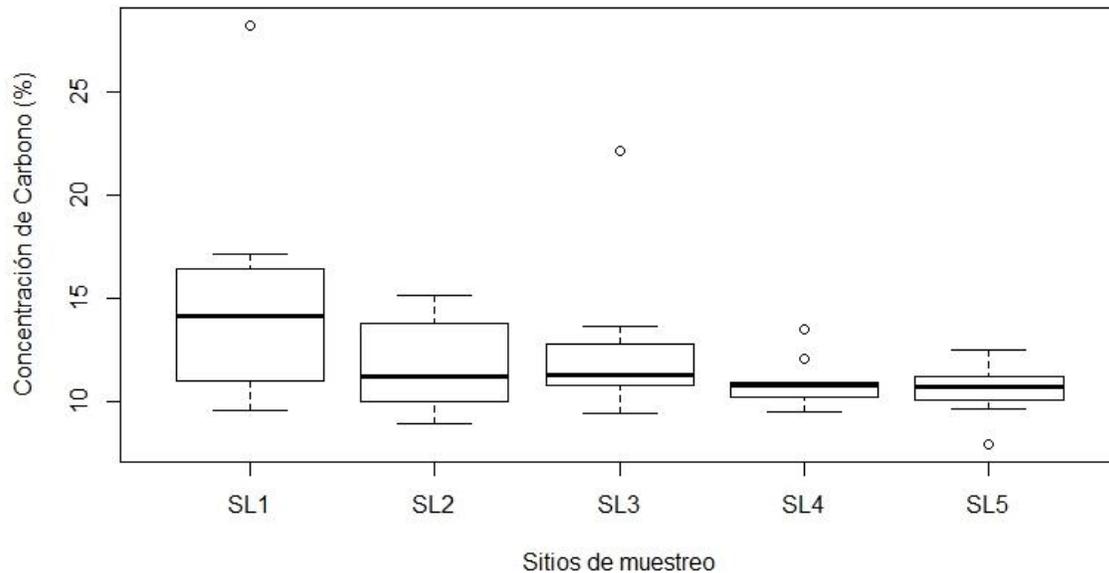


Gráfico 7. Distribución de la concentración de carbono en suelo % (en peso) por sitios de muestreo.

4.2.1 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 (Mg ha^{-1}) = densidad aparente (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 $\text{CT} = 11,88 \%$ y considerando la densidad aparente de 1 g cm^{-3} , tenemos.

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

Calculando la concentración de 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 **$784792,8 \text{ MgCO}_2\text{-eq} = 0,0007847928 \text{ GtCO}_2 \text{ eq}$**

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 g mol^{-1}] y el carbono [12 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.

4.2.2 Variación vertical del contenido de Carbono total en Suelo.

Distribución del carbono total en un núcleo de suelo (Gráfico 8), colectado manualmente obtenido del sitio SL1, empleando tubos de PVC de 8,6 cm de diámetro con longitud de 32 centímetros, se observa poca variabilidad en los datos, con una mediana cercana al 12% (% en peso).

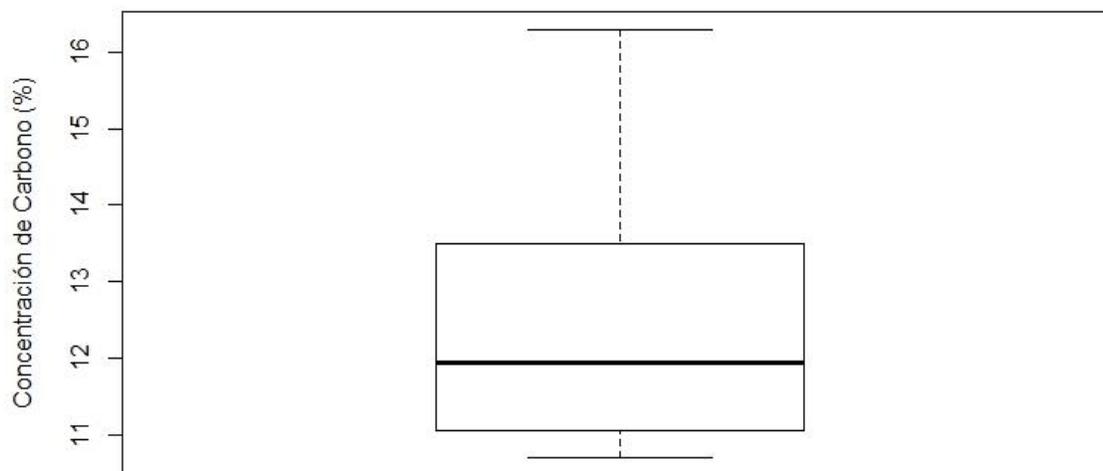


Gráfico 8. Variación de Carbono en núcleo de suelo de 32 cm de longitud.

Distribución de carbono total en (% en peso) en un núcleo de suelo de 32 cm de longitud contra profundidad (Gráficos 8-9), extraído del sitio SL1 seleccionado por abundancia de bosque y poco impacto por urbanización en el Lago de Coatepeque.

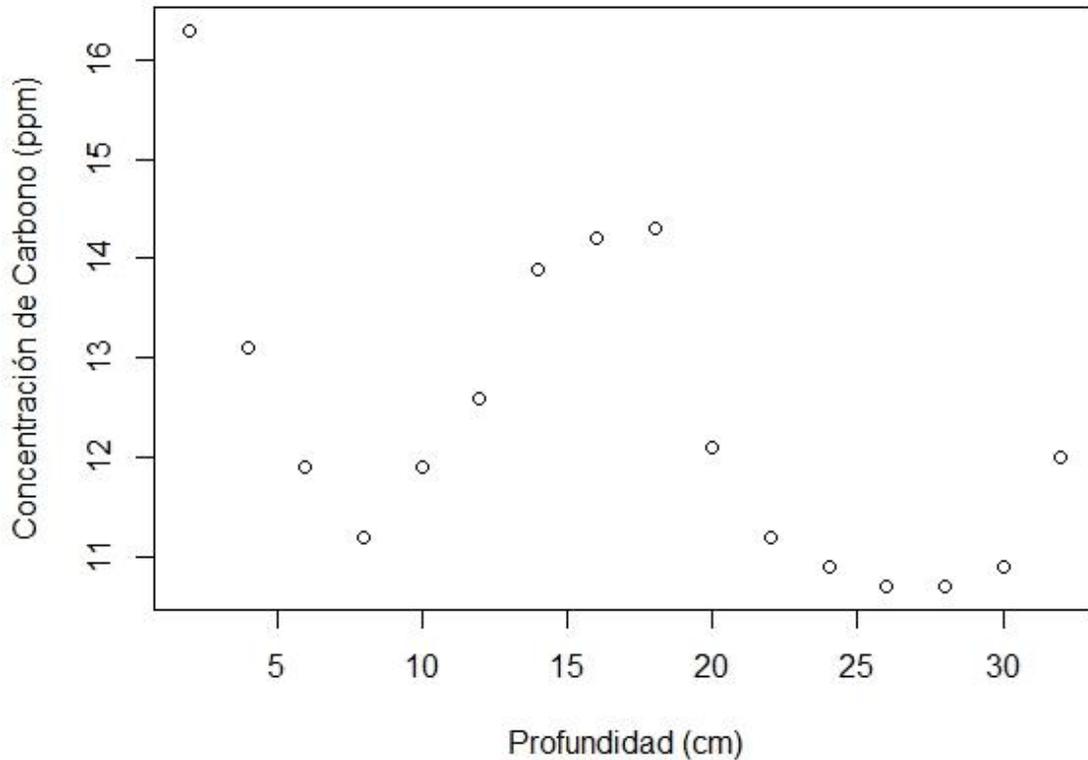


Gráfico 9. Concentración de carbono en (%) contra profundidad, para un núcleo de suelo.

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 g cm^{-3} , tenemos.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

El CO₂-eq de la cuenca del Lago de Coatepeque es **13074595,2 MgCO₂ eq =**

0,0130745952 GtCO₂-eq

4.3 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 también se recolectaron muestras de sedimento depositados a 15 metros de profundidad con ayuda de buceo autónomo con bolsas tipo Ziploc de plástico (~1,0 kg de sedimento), puntos de muestreo se presentan en la figura 8.

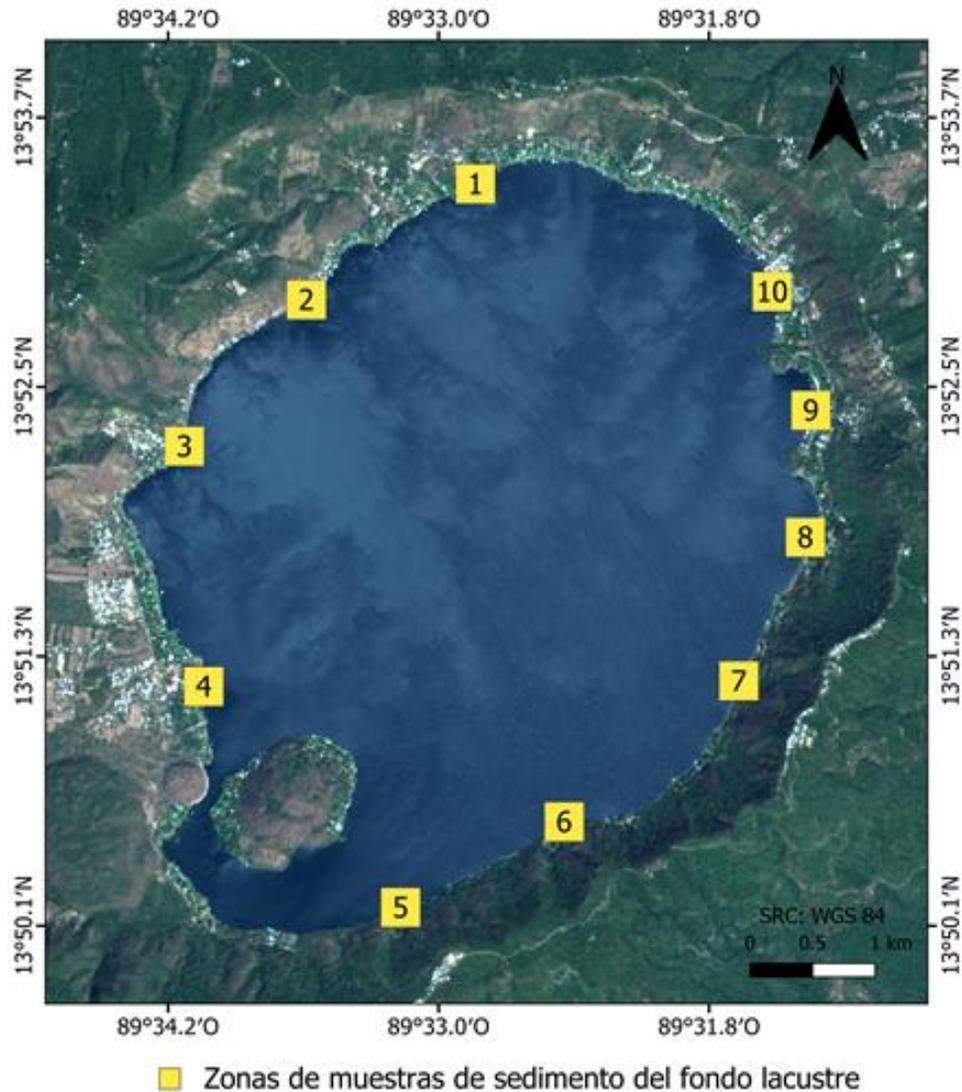


Fig. 8. Mapa ubicación puntos de muestreo de sedimento depositado a 15 m de profundidad.

Se ha sugerido que los almacenes de carbono en los lagos provienen de entradas de carbono orgánico CO 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 % ²
--------	---	------------	-------------------------

Noviembre 2020	10	13,57	7,33
Diciembre 2020	5	14,78	3,04
Marzo 2021	6	12,88	3,80
Abril 2021	7	11,53	0,93
Mayo 2021	8	11,80	2,40
Junio 2021	10	12,28	5,71
Julio 2021	10	12,95	3,45

Distribución de la concentración de carbono en sedimento depositado (Gráfico 10) 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.

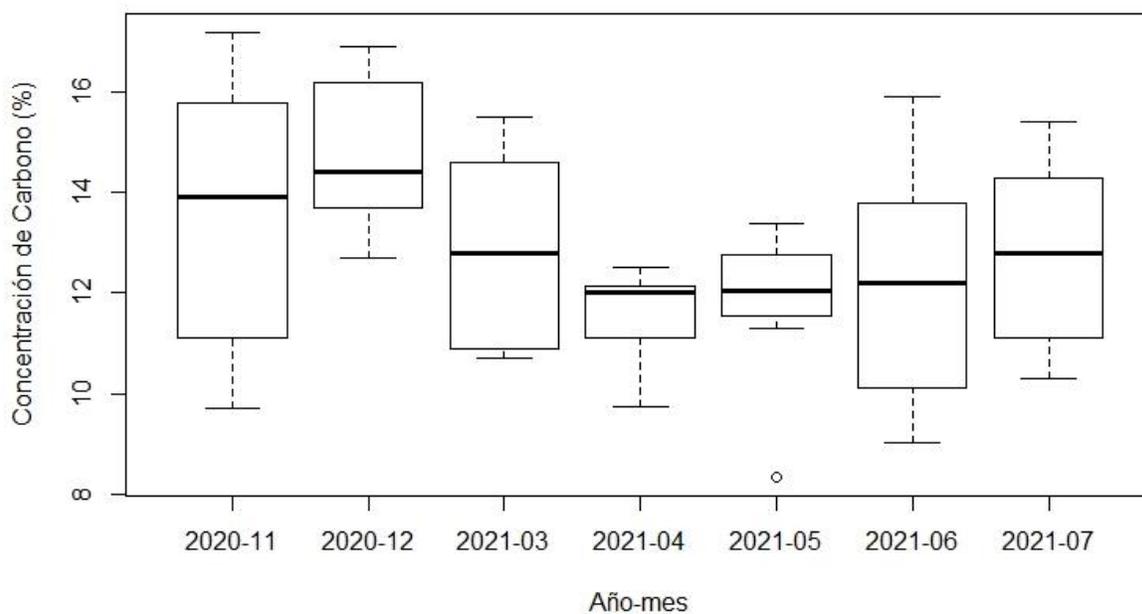


Gráfico 10. Distribución de la concentración de carbono en sedimento por mes.

4.3.1 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.

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

Distribución de la concentración de carbono en sedimento depositado (Gráfico 11) 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.

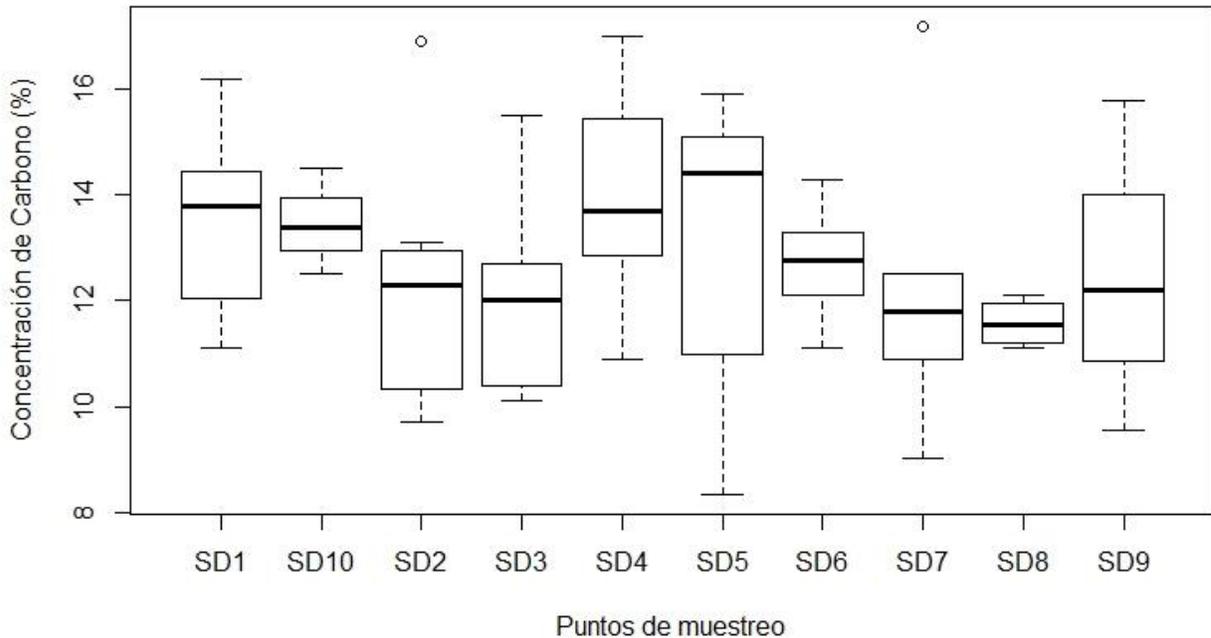


Gráfico 11. Distribución de la concentración de carbono (% en peso) en sedimento depositado contra puntos de muestreo.

4.3.2 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 (Mg ha^{-1}) = densidad aparente (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 $CT = 12,76\%$ y considerando la densidad aparente de 1 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 = $(191,4 \text{ Mg ha}^{-1}) \times (2530 \text{ ha}) = \mathbf{484242 \text{ MgC}}$

$0,000484242 \text{ GtC}$

Conversión de carbono a dióxido de carbono equivalentes CO₂ eq

$$484242 \text{ Mg C} * 3.67 = 1777168,14 \text{ MgCO}_2 \text{ eq}$$

El CO₂ eq de la cuenca del Lago de Coatepeque es **1777168,14 MgCO₂ eq = 0,00177716814 GtCO₂-eq**

La densidad total de carbono o reserva total de carbono es convertida en CO₂ eq multiplicando por 3,67, que es la relación de pesos moleculares entre el dióxido de carbono [44 g mol⁻¹] y el carbono [12 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.

4.4 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 %²
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 12). 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.

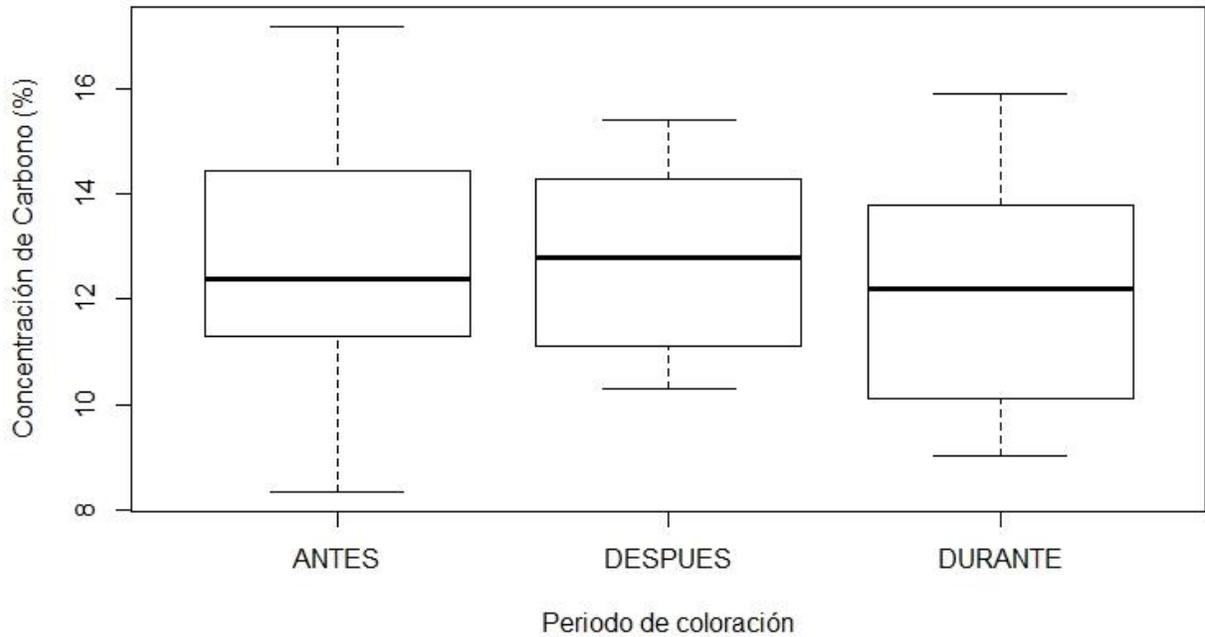


Gráfico 12. Distribución de carbono total por periodos de coloración turquesa.

Los coeficientes de correlación de Pearson entre las variables analizadas en sedimento no muestran correlación significativa con la variable de interés carbono total, como se presenta en la figura 9. Lo anterior indica que no hay una relación directa entre el cambio de coloración turquesa y el contenido de carbono total sedimentario en el Lago de Coatepeque.

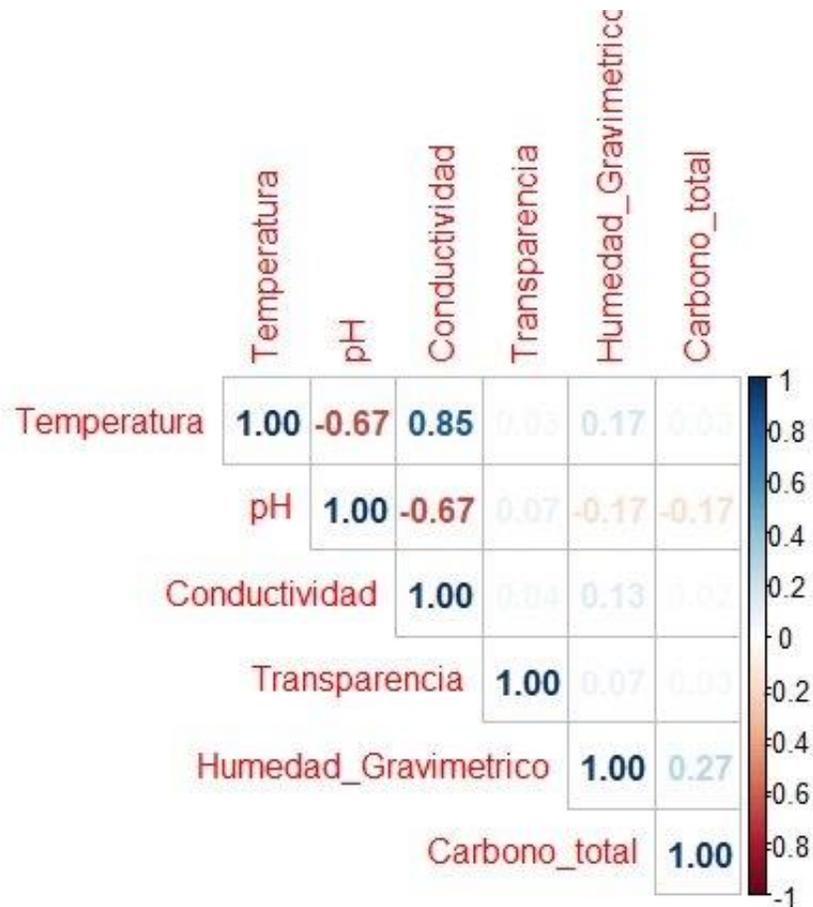


Fig. 9. Coeficientes de correlación de Pearson entre variables correlación significativa e inversa con pH, T y transparencia.

4.5 Variabilidad de carbono total dentro de cada grupo y prueba de homogeneidad.

4.5.1 Puntos homogéneos en agua, por profundidad.

Los cuadros 10 y 11 presentan el análisis de varianza de un factor para carbono total medido en muestras de agua del Lago de Coatepeque, colectadas en perfil vertical a 1, 10 y 20 metros de profundidad.

Cuadro 10. Varianza y valores promedio de carbono en perfil vertical para prueba de homogeneidad.

Grupos	n	Suma	Promedio ppm	Varianza ppm ²
1 m	26	1518,34	58,40	2,33

10 m	13	769,04	59,16	1,71
20 m	19	1112,69	58,56	2,21

Cuadro 11. Análisis de varianza de un factor con resultados de carbono en agua en perfil vertical.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Razón F	Prob>F	Valor crítico para F
Entre grupos	5,09	2	2,55	1,18	0,31	3,16
Dentro de los grupos	118,51	55	2,15			
Total	123,61	57				

Pruebas a posteriori

Dado que el análisis de varianza indica que los promedios no son diferentes de los otros, procedemos a realizar pruebas a posteriori, para probar las hipótesis $H_0=0$.

Se aplicó la prueba de la Diferencia Mínima Significativa (DMS)

Utilizando la ecuación 1, Excel y R, tenemos.

Cuadro 12. Diferencia Mínima Significativa DMS entre grupos de agua en perfil vertical.

r	17	tamaño muestral promedio
t	2,00	valor de la distribución t
DMS	1,01	diferencia mínima significativa

Demostración para carbono total en agua a distintas profundidades

Asumiendo un nivel de confianza de 5%, tenemos $\alpha = 0,05$ (95%) y 2 grados de libertad, $t_{0,05, 2}$.

Una pareja de medias difiere significativamente si el valor absoluto de la diferencia de promedios en los tratamientos componentes es mayor o igual a $DMS=1,01$

$$H_0 \mu_1=\mu_2 \quad 58,40-59,16= 0,76 > 1,01$$

Se acepta H_1 , es decir no existe diferencia significativa entre mediciones de Carbono total en agua a 1, 10 y 20 m de profundidad, en el cuadro 13 se muestran las DMS para todos los grupos.

Cuadro 13. Prueba DMS entre grupos de agua en perfil vertical.

DMS			
	1 m	10 m	20 m
1 m	0	0,76	0,16
10 m		0	0,59
20 m			0

El cuadro 14 se interpreta como: Los grupos de agua a profundidades 1, 10 y 20 m, están unidos por una línea vertical de “X” por lo tanto sus medias no son diferentes entre sí.

Cuadro 14. Resultados de la prueba de múltiples rangos para carbono total en perfil vertical.

PROFUNDIDAD	n	MEDIA ppm	GRUPOS HOMOGÉNEOS
1 m	26	58,40	X
10 m	13	59,16	X
20 m	19	58,56	X

4.5.2 Puntos homogéneos en agua, variación espacial.

Los cuadros 15 y 16 presentan el análisis de varianza de un factor para carbono total, medido en muestras de agua del Lago de Coatepeque, colectadas espacialmente en 5 puntos del lago.

Cuadro 15. Varianza y valores promedio de carbono en agua en distintos puntos.

Grupos	n	Suma	Promedio ppm	Varianza ppm²
P1	12	702,99	58,58	2,92
P2	12	704,59	58,72	1,27
P3	10	582,08	58,21	1,72
P4	12	705,24	58,77	2,38
P5	11	648,27	58,93	2,97

Cuadro 16. Análisis de varianza de un factor de carbono total en agua distribuidos espacialmente.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Razón F	Prob>F	Valor crítico para F
Entre grupos	3,12	4	0,78	0,35	0,85	2,55
Dentro de los grupos	117,47	52	2,26			
Total	120,59	56				

Pruebas a posteriori

Dado que el análisis de varianza indica que los promedios no son diferentes de los otros, procedemos a realizar pruebas a posteriori, para probar la hipótesis $H_0=0$.

Se aplicó la prueba de la Diferencia Mínima Significativa (DMS)

Utilizando la ecuación 1, Excel y R, tenemos.

Cuadro 17. DMS para análisis de varianza de un factor entre grupos de agua distribuidos espacialmente.

r	11	tamaño muestral promedio
t	2,01	valor de la distribución t
DMS	1,29	diferencia mínima significativa

Demostración para carbono total en agua en puntos distribuidos espacialmente

Asumiendo un nivel de confianza de 5%, tenemos $\alpha = 0,05$ (95%) y 4 grados de libertad, $t_{0,05, 4}$.

Una pareja de medias difiere significativamente si el valor absoluto de la diferencia de promedios en los tratamientos componentes es mayor o igual a $DMS=1,29$

$$H_0 \mu_1=\mu_2 \quad 58,58-58,72= 0,14 > 1,29$$

Se acepta H_1 , es decir no existe diferencia significativa entre mediciones de carbono total en agua en puntos distribuidos espacialmente, en el cuadro 18 se muestran las DMS para todos los grupos.

Cuadro 18. Prueba DMS entre grupos de agua espacialmente distribuidos.

DMS					
	P1	P2	P3	P4	P5
P1	0	0,13	0,37	0,19	0,35
P2		0	0,51	0,05	0,22

P3			0	0,56	0,73
P4				0	0,16
P5					0

El cuadro 19 se interpreta como: Los grupos de agua a diferentes profundidades en 5 puntos del lago espacialmente distribuidos, están unidos por una línea vertical de “X” por lo tanto sus medias no son diferentes entre sí.

Cuadro 19. Resultados prueba de múltiples rangos para carbono total en agua por puntos de muestreo.

PUNTOS DE MUESTREO	n	MEDIA ppm	GRUPOS HOMOGÉNEOS
P1	12	58,58	X
P2	12	58,72	X
P3	10	58,21	X
P4	12	58,77	X
P5	11	58,93	X

4.5.3 Puntos homogéneos en agua, variación temporal.

Los cuadros 20 y 21 presentan el análisis de varianza de un factor para carbono total, medido en muestras de agua del Lago de Coatepeque, colectadas en diferentes tiempos en el lago.

Cuadro 20. Varianza y valores promedio de carbono total en agua por mes.

Grupos	n	Suma	Promedio ppm	Varianza ppm²
Oct 2020	10	569,57	56,96	0,36
Nov 2020	9	513,92	57,10	0,06
Dic 2020	10	583,17	58,32	0,15
Feb 2021	14	845,57	60,40	0,31
Mar 2021	14	830,94	59,35	0,80

Cuadro 21. Análisis de varianza de un factor en agua en distintos tiempos.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Razón F	Prob>F	Valor crítico para F
Entre grupos	101,02	4	25,25	67,09	6,71426E-20	2,55

Dentro de los grupos	19,57	52	0,38			
Total	120,59	56				

Pruebas a posteriori

Dado que el análisis de varianza indica que los promedios no son diferentes de los otros, procedemos a realizar pruebas a posteriori, para probar la hipótesis $H_0 = 0$.

Se aplicó la prueba de la Diferencia Mínima Significativa (DMS)

Utilizando la ecuación 1, Excel y R, tenemos.

Cuadro 22. DMS para análisis de varianza de un factor entre grupos de agua para distintos tiempos.

r	11	tamaño muestral promedio
t	2,01	valor de la distribución t
DMS	0,52	diferencia mínima significativa

Demostración para carbono total en agua en muestras colectadas en distintos meses

Asumiendo un nivel de confianza de 5%, tenemos $\alpha = 0,05$ (95%) y 4 grados de libertad, $t_{0,05, 4}$.

Una pareja de medias difiere significativamente si el valor absoluto de la diferencia de promedios en los tratamientos componentes es mayor o igual a $DMS = 0,52$

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \quad 56,96 - 57,10 = 0,76 > 0,52$$

Se acepta H_0 , es decir no existe diferencia significativa entre mediciones de Carbono total en agua en distintos meses, en el cuadro 23 se muestran las DMS para todos los grupos.

Cuadro 23. Resultados de la prueba de múltiples rangos para carbono total en agua a distintos tiempos.

	DMS				
	Oct 2020	Nov 2020	Dic 2020	Feb 2021	Mar 2021
Oct 2020	0	0,15	1,36	3,44	2,40
Nov 2020		0	1,21	3,30	2,25
Dic 2020			0	2,08	1,04
Feb 2021				0	1,05
Mar 2021					0

El cuadro 24 se interpreta como: Los grupos de agua colectados en octubre y noviembre 2020 en el lago, están unidos por una línea vertical de “X” por lo tanto sus medias no son diferentes entre sí, mientras diciembre 2020, febrero y marzo 2021 sus medias o promedios difieren entre sí.

Cuadro 24. Resultados de la prueba de múltiples rangos para carbono total en agua a distintos tiempos.

TIEMPO DE MUESTREO	n	MEDIA ppm	GRUPOS HOMOGÉNEOS			
Oct 2020	10	56,96	X			
Nov 2020	9	57,10	X			
Dic 2020	10	58,32		X		
Feb 2021	14	60,40			X	
Mar 2021	14	59,35				X

4.5.4 Puntos homogéneos en suelo, variación espacial.

Los cuadros 25 y 26 presentan el análisis de varianza de un factor para carbono total medido en muestras de suelo colectadas en diferentes sitios del Lago de Coatepeque.

Cuadro 25. Varianza y valores promedio de carbono total en suelo en diferentes sitios.

Grupos	n	Suma	Promedio %	Varianza ppm ²
SL1	10	150,2	15,02	27,62
SL2	15	175,97	11,73	4,27
SL3	16	194,86	12,18	8,35
SL4	14	151,47	10,82	0,98
SL5	15	158,91	10,59	1,28

Cuadro 26. Análisis de varianza de un factor de carbono total en suelo en distintos sitios.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Razón F	Prob<F	Valor crítico para F
Entre grupos	140,91	4	35,23	4,93	0,00155	2,51
Dentro de los grupos	464,21	65	7,14			
Total	605,13	69				

Pruebas a posteriori

Dado que el análisis de varianza indica que los promedios no son diferentes de los otros, procedemos a realizar pruebas a posteriori, para probar la hipótesis $H_0=0$.

Se aplicó la prueba de la Diferencia Mínima Significativa (DMS)

Utilizando la ecuación 1, Excel y R, tenemos.

Cuadro 27. DMS para análisis de varianza de un factor entre grupos de suelo distribuidos espacialmente.

r	13	tamaño muestral promedio
t	2,00	valor de la distribución t
DMS	2,09	diferencia mínima significativa

Demostración para carbono total en suelo en muestras colectadas en distintos sitios

Asumiendo un nivel de confianza de 5%, tenemos $\alpha = 0,05$ (95%) y 4 grados de libertad, $t_{0,05, 4}$.

Una pareja de medias difiere significativamente si el valor absoluto de la diferencia de promedios en los tratamientos componentes es mayor o igual a $DMS = 2,09$

$$H_0 \mu_1 = \mu_2 \quad 15,02 - 11,73 = 3,29 > 2,09$$

Se acepta H_1 , es decir no existe diferencia significativa entre mediciones de Carbono total en suelo en distintos sitios, en el cuadro 32 se muestran las DMS para todos los grupos.

Cuadro 28. Resultados prueba de múltiples rangos para carbono total en suelo por sitios.

DMS					
	SL1	SL2	SL3	SL4	SL5
SL1	0	3,29	2,84	4,20	4,43
SL2		0	0,45	0,91	1,14
SL3			0	1,36	1,58
SL4				0	0,23
SL5					0

El cuadro 29 se interpreta como: Los grupos de suelo colectados en distintos sitios en el lago, están unidos por una línea vertical de “X” por lo tanto sus medias no son diferentes entre sí, mientras SL1 sus medias difieren entre sí.

Cuadro 29. Grupos homogéneos de carbono total en suelo por sitio.

SITIO DE MUESTREO	n	MEDIA	GRUPOS HOMOGÉNEOS	
SL1	10	15,02	X	
SL2	9	11,73		X
SL3	10	12,18		X
SL4	14	10,82		X
SL5	14	10,59		X

4.5.5 Análisis de Variancia en Núcleo de suelo.

El cuadro 30 presenta el análisis de varianza de un factor para carbono total medido en un núcleo de suelo de 30 cm de longitud del Lago de Coatepeque.

Cuadro 30. Análisis de varianza de un factor en núcleo de suelo.

Número de observaciones	Promedio %	Varianza % ²	Desviación %	Coefficiente de variación %
16	12,37	2,42	1,56%	12,58

$$CV = \frac{S}{\bar{x}}$$

Utilidad del coeficiente de variación

VALOR DEL C.V.	GRADO EN QUE LA MEDIA REPRESENTA AL CONJUNTO DE DATOS
0-<10%	Media altamente representativa
10% - < 20%	Media bastante representativa
20% - < 30%	Media tiene representatividad
30%- < 40%	Media con representatividad dudosa
40% o más	Media carente de representatividad

4.5.6 Puntos homogéneos en Sedimento del lago, variación espacial

Los cuadros 31 y 32 presentan el análisis de varianza de un factor para carbono total medido en muestras de sedimento del Lago de Coatepeque, colectadas a 15 metros de profundidad.

Cuadro 31. Varianza y concentraciones promedio de carbono total en sedimento en distintos puntos.

Grupos	Cuenta n	Suma	Promedio	Varianza
SD1	7	94,1	13,44	3,20
SD2	7	85,44	12,21	6,21
SD3	7	83,8	11,97	3,66
SD4	7	98,2	14,03	4,36
SD5	7	90,83	12,98	8,23
SD6	6	76,3	12,72	1,29
SD7	5	61,41	12,28	9,27
SD8	4	48,3	12,08	1,51
SD9	3	37,54	12,51	9,87
SD10	3	40,4	13,47	1,00

Cuadro 32. Análisis de varianza de un factor en sedimento en distintos puntos.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Razón F	Prob>F	Valor crítico para F
Entre grupos	26,01	9	2,89	0,59	0,80	2,09
Dentro de los grupos	223,77	46	4,86			
Total	249,78	55				

Pruebas a posteriori

Dado que el análisis de varianza indica que los promedios no son diferentes de los otros, procedemos a realizar pruebas a posteriori, para probar las hipótesis $H_0=0$.

Se aplicó la prueba de la Diferencia Mínima Significativa (DMS)

Utilizando la ecuación 1, Excel y R, tenemos.

Cuadro 33. Valores r, t, y DMS para análisis de varianza de un factor entre grupos de sedimento distribuidos espacialmente.

r	5	tamaño muestral promedio
t	2,01	valor de la distribución t
DMS	2,81	diferencia mínima significativa

Demostración para carbono total en sedimento colectado a 15 metros de profundidad

Asumiendo un nivel de confianza de 5%, tenemos $\alpha = 0,05$ (95%) y 2 grados de libertad, $t_{0,05, 9}$.

Una pareja de medias difiere significativamente si el valor absoluto de la diferencia de promedios en los tratamientos componentes es mayor o igual a $DMS = 2,81$

$$H_0 \mu_1 = \mu_2 \quad 13,44 - 12,21 = 1,23 > 2,81$$

Se acepta H_1 , es decir no existe diferencia significativa entre mediciones de Carbono total en sedimento colectado a 15 m de profundidad, en el cuadro 34 se muestran las DMS para todos los grupos.

Cuadro 34. Prueba DMS entre grupos de sedimento a 15 m de profundidad.

	DMS									
	SD1	SD2	SD3	SD4	SD5	SD6	SD7	SD8	SD9	SD10
SD1	0	1,24	1,47	0,59	0,47	0,73	1,16	1,37	0,93	0,02
SD2		0	0,23	1,82	0,77	0,51	0,08	0,13	0,31	1,26
SD3			0,00	2,06	1,00	0,75	0,31	0,10	0,54	1,50
SD4				0,00	1,05	1,31	1,75	1,95	1,52	0,56
SD5					0,00	0,26	0,69	0,90	0,46	0,49
SD6						0,00	0,43	0,64	0,20	0,75
SD7							0,00	0,21	0,23	1,18
SD8								0,00	0,44	1,39
SD9									0,00	0,95
SD10										0

El cuadro 35 se interpreta como: Los grupos de sedimento colectado a 15 m de profundidad están unidos por una línea vertical de "X" por lo tanto sus medias no son diferentes entre sí.

Cuadro 35. Resultados prueba de múltiples rangos para carbono total en sedimento en distintos puntos.

SITIOS DE MUESTREO	n	MEDIA	GRUPOS HOMOGÉNEOS
--------------------	---	-------	-------------------

SD1	7	13,44	X
SD2	7	12,21	X
SD3	7	11,97	X
SD4	7	14,03	X
SD5	7	12,98	X
SD6	6	12,72	X
SD7	5	12,28	X
SD8	4	11,58	X
SD9	3	12,51	X
SD10	3	13,47	X

4.5.7 Puntos homogéneos en sedimento, variación temporal.

Los cuadros 36 y 37 presentan el análisis de varianza de un factor para carbono total, medido en muestras de sedimento del Lago de Coatepeque, colectadas a 15 m de profundidad en diferentes tiempos en el lago.

Cuadro 36. Varianza y concentraciones promedio de carbono total en sedimento por mes.

Grupos	n	Suma	Promedio %	Varianza %²
Noviembre 2020	10	135,70	13,57	7,33
Diciembre 2020	5	73,90	14,78	3,04
Marzo 2021	6	77,30	12,88	3,80
Abril 2021	7	80,74	11,53	0,93
Mayo 2021	8	94,43	11,80	2,40
Junio 2021	10	122,75	12,28	5,71
Julio 2021	10	129,5	12,95	3,45

Cuadro 37. Análisis de varianza de un factor en sedimento en distintos tiempos del Lago.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Razón F	Prob>F	Valor crítico para F
Entre grupos	47,60	6	7,93	1,92	0,10	2,29
Dentro de los grupos	202,08	49	4,12			

Total	249,68	55				

Pruebas a posteriori

Dado que el análisis de varianza indica que los promedios no son diferentes de los otros, procedemos a realizar pruebas a posteriori, para probar la hipótesis $H_0=0$.

Se aplicó la prueba de la Diferencia Mínima Significativa (DMS)

Utilizando la ecuación 1, Excel y R, tenemos.

Cuadro 38. DMS para análisis de varianza de un factor entre grupos de sedimento en distintos puntos.

r	7	tamaño muestral promedio
t	2,01	valor de la distribución t
DMS	2,18	diferencia mínima significativa

Demostración para carbono total en sedimento colectado a 15 metros de profundidad

Asumiendo un nivel de confianza de 5%, tenemos $\alpha = 0,05$ (95%) y 6 grados de libertad, $t_{0,05,6}$.

Una pareja de medias difiere significativamente si el valor absoluto de la diferencia de promedios en los tratamientos componentes es mayor o igual a $DMS = 2,18$

$$H_0 \mu_1 = \mu_2 \quad 13,57 - 14,78 = 1,21 > 2,18$$

Se acepta H_1 , es decir no existe diferencia significativa entre mediciones de Carbono total en sedimento colectado a 15 m de profundidad, en el cuadro 39 se muestran las DMS para todos los grupos.

Cuadro 39. Prueba de DMS entre grupos de sedimento a 15 m de profundidad.

DMS							
	Noviembre 2020	Diciembre 2020	Marzo 2021	Abril 2021	Mayo 2021	Junio 2021	Julio 2021
Noviembre 2020	0	1,21	0,69	2,04	1,77	1,30	0,62
Diciembre 2020		0	1,90	3,25	2,98	2,51	1,83
Marzo 2021			0	1,35	1,08	0,61	0,07

Abril 2021				0	0,27	0,74	1,42
Mayo 2021					0	0,47	1,15
Junio 2021						0	0,67
Julio 2021							0

El cuadro 40 se interpreta como: Los grupos de sedimento colectado a 15 m de profundidad están unidos por una línea vertical de “X” por lo tanto sus medias no son diferentes entre sí.

Cuadro 40. Resultados prueba de múltiples rangos para carbono total en sedimento en distintos puntos.

TIEMPO DE MUESTREO	OBSERVACIONES	MEDIA	GRUPOS HOMOGÉNEOS	
Noviembre 2020	10	13,57	X	X
Diciembre 2020	5	14,78		X
Marzo 2021	6	12,88	X	X
Abril 2021	7	11,53	X	
Mayo 2021	8	11,80	X	
Junio 2021	10	12,28	X	
Julio 2021	10	12,95	X	X

4.5.8 Puntos homogéneos en sedimento, variación en cambio de coloración turquesa.

Los cuadros 41 y 42 presentan el análisis de varianza de un factor para carbono total, medido en muestras de sedimento del Lago de Coatepeque, colectadas a 15 m de profundidad durante la etapa de cambio de coloración turquesa en el Lago.

Cuadro 41. Varianza y valores promedio de carbono total en sedimento, durante cambio de coloración turquesa.

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
ANTES	36	462,07	12,84	11,95
DURANTE	10	129,50	12,95	3,45
DESPUÉS	10	122,75	12,28	5,71

Cuadro 42. Análisis de varianza de un factor en sedimento durante cambio de coloración.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Razón F	Prob>F	Valor crítico para F
Entre grupos	2,92	2	1,46	0,15	0,86	3,17
Dentro de los grupos	500,76	53	9,45			
Total	503,68	55				

Pruebas a posteriori

Dado que el análisis de varianza indica que los promedios no son diferentes de los otros, procedemos a realizar pruebas a posteriori, para probar las hipótesis $H_0 = 0$.

Se aplicó la prueba de la Diferencia Mínima Significativa (DMS)

Utilizando la ecuación 1, Excel y R, tenemos.

Cuadro 43. DMS para análisis de varianza de un factor entre grupos de sedimento distribuidos espacialmente durante cambio de coloración turquesa.

r	17	tamaño muestral promedio
t	2,01	valor de la distribución t
DMS	2,11	diferencia mínima significativa

Demostración para carbono total en sedimento colectado a 15 metros de profundidad durante cambio de coloración turquesa

Asumiendo un nivel de confianza de 5%, tenemos $\alpha = 0,05$ (95%) y 2 grados de libertad, $t_{0,05, 2}$.

Una pareja de medias difiere significativamente si el valor absoluto de la diferencia de promedios en los tratamientos componentes es mayor o igual a $DMS = 2,11$

$$H_0 \mu_1 = \mu_2 \quad 12,84 - 12,95 = 0,11 > 2,11$$

Se acepta H_1 , es decir no existe diferencia significativa entre mediciones de Carbono total en sedimento colectado a 15 m de profundidad, durante cambio de coloración turquesa, en el cuadro 44 se muestran las DMS para todos los grupos.

Cuadro 44. Prueba de DMS entre grupos de sedimento a 15 m de profundidad durante cambio de coloración turquesa.

DMS			
	ANTES	DURANTE	DESPUÉS
ANTES	0	0,11	0,56
DURANTE		0,00	0,67
DESPUÉS			0

El cuadro 45 se interpreta como: Los grupos de sedimento colectado a 15 m de profundidad durante el cambio de coloración turquesa están unidos por una línea vertical de “X” por lo tanto sus medias no son diferentes entre sí.

Cuadro 45. Grupos homogéneos para carbono total en sedimento durante cambio de coloración turquesa.

COLORACIÓN	OBSERVACIONES	MEDIA	GRUPOS HOMOGÉNEOS
ANTES	36	12,84	X
DURANTE	10	12,95	X
DESPUÉS	10	12,28	X

4.5.9 Comparación con otros estudios

Finalmente, en los cuadros 46 y 47 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 46. Comparación de concentraciones de carbono en agua, sedimentos y suelo obtenidos en este estudio con otros lagos.

AGUA						
Nombre	CTP	COP	COT	CT	CO ₂ eq	Fuente
Lagos prístinos MX	843±591 µg L ⁻¹ promedio	579±356 µg L ⁻¹ promedio				(Oseguera, L y Alcocer, 2015)
Lagos impactados MX	3454±2021 µg L ⁻¹	2919±1825 µg L ⁻¹				

Este estudio				58,76 mg L ⁻¹ promedio	4,90 mmol/kg	Este estudio
Lago Alchichica MX		1,0 ± 0,7 mg L ⁻¹				(Alcocer, 2007)
Lago Albufera des Grau España			14,5 mg L ⁻¹			(Obrador, Biel & Pretus, Joan Lluís, 2013)
Lago Monoun				338 mg L ⁻¹		(Yoshida et al., 2017)
Lago Nyos -200 m			60 mg L ⁻¹			
Lago Nyos -99 m					92,50 mmol/kg	(Evans et al., 1994)
SEDIMENTO						
		COT		CT		
Este estudio				12,76 %		
Lago Esthwaite Inglaterra				13 %		(Brunskill, 1971)
Lago Mendota. Wisconsin EEUU.				10 %		
Lagos de Montebello Chiapas. MEX.				9,4 %		(Alcocer, 2016)
SUELO						
Este estudio				11,88 %	1453 (t/ha)	
Para suelos histosoles					1170 (t/ha)	(Lal, 2004)

Cuadro 47. Carbono almacenado en suelo y sedimento con su equivalente en CO₂

Lugar Ecosistema	Carbono Almacenado MgC ha⁻¹	MgCO₂-eq ha⁻¹	
Lago de Coatepeque Suelo (32 cm)	395,84	1452,73	
Lago de Coatepeque Suelo (2 cm)	23,76	87,20	

Lago de Coatepeque Sedimento (15 cm, 15 m prof.)	191,00	700.97	
Carbono en la cuenca	MgC	MgCO₂-eq	GtCO₂-eq
En suelo (32 cm)	3562560,00	13074595,20	0,013075
En sedimento (15 cm, 15 m prof.)	484242,00	1777168,14	0,001777
En agua	110000,00	400000,00	0,000400
Total carbono almacenado en la cuenca (Suelo + Sedimento + Agua)	4156802,00	15251763,34	0,015252

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 Nyos, 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.

5. CONCLUSIONES

1. Se encontró que la concentración de carbono está controlada por la temperatura del agua, presentando un coeficiente de correlación de Pearson negativo (-0,78), indicando que debe considerarse la época del año para monitoreo de carbono, en donde la capa superficial de agua analizada (0 a 20 m) presentó un comportamiento térmico con un gradiente de temperatura de 23 a 30 °C.
2. 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), a pesar de esta relativa abundancia cada componente aporta significativamente a mantener el equilibrio de la cuenca, el espejo de agua aun cuando presentó el menor valor es el que sufre mayor impacto de las actividades humanas.
3. El total de carbono almacenado en los tres componentes analizados (Suelo + Sedimento + Agua) fue de 4156802,00 MgC, correspondiéndole una concentración de dióxido de carbono equivalente de 0,015252 GtCO₂-eq, estos valores son congruentes con el aporte de carbono a escala global reportado en la literatura científica, a falta de datos nacionales de carbono en lagos para comparación, pueden considerarse como línea base contribuyendo a la gestión de riesgos, adaptación y mitigación del cambio climático.
4. Las concentraciones de carbono obtenidas en el Lago de Coatepeque están distribuidas uniformemente en todo el cuerpo de agua y son inferiores a los encontrados en el lago Monoun en África, por lo que es poco probable que ocurra una erupción límnic.
5. No se encontró diferencia significativa en la concentración de carbono en sedimentos superficiales (promedio 12,76 % en peso) con muestras de suelo (promedio 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.

6. 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 para observar cambios de carbono por diversas actividades realizadas en la cuenca, esto permitiría una caracterización más precisa de los efectos de cambios locales y su respuesta con el cambio climático.
- Evaluar las concentraciones de isotopos estables de carbono (^{13}C) y (^{12}C), oxígeno (^{18}O), y deuterio (^2H), 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 (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) 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.
- Es necesario generar protocolos para la evaluación del contenido de carbono en lagos de El Salvador, fortalecer capacidades humanas, equipamiento e infraestructura.

7. BIBLIOGRAFÍA

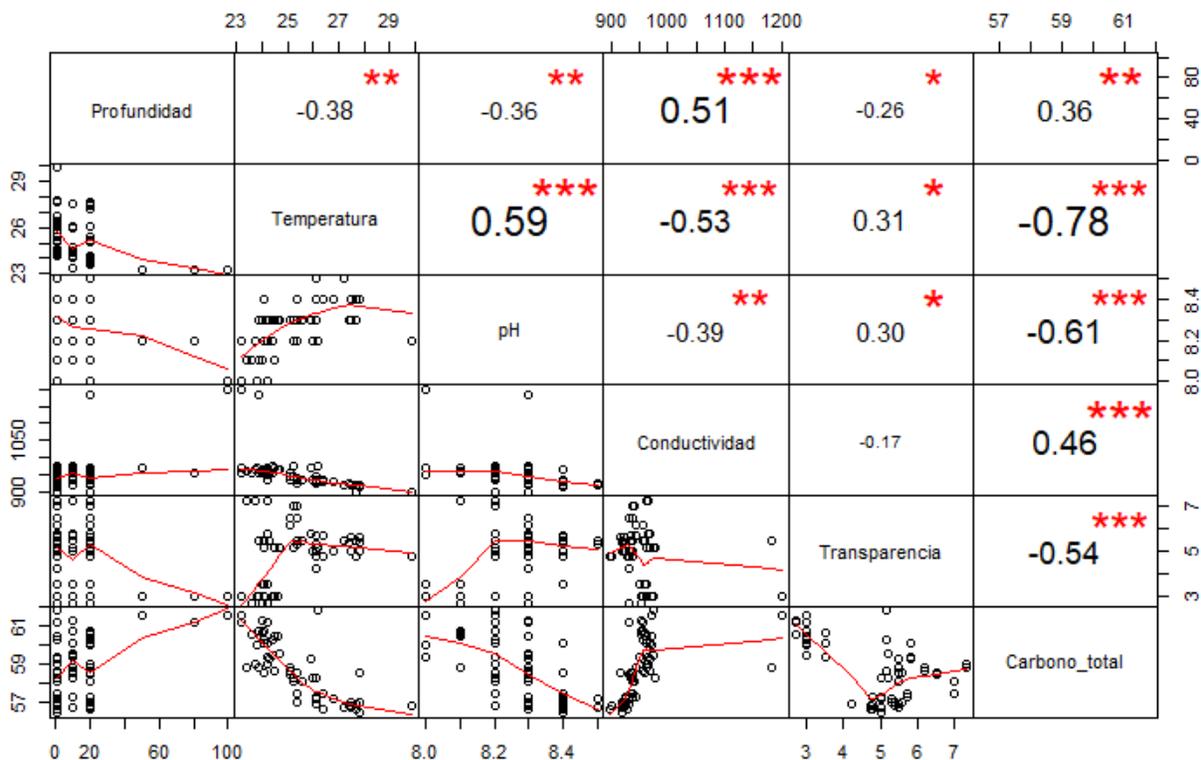
- Alcocer, J. et. al. (2007). Carbono en ecosistemas acuáticos de México. In C. Hernandez, b. y G (Ed.), *Carbono en ecosistemas acuáticos de México* (1st ed., Issue January 2007, p. 508). <https://doi.org/10.13140/2.1.4413.7927>
- Alcocer, J. et. al. (2016). Contenido de carbono elemental en sedimentos 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
- 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 Slvador. 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 Of Lakes and Reservoirs*, 160–163. 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
- 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>

8. ANEXOS

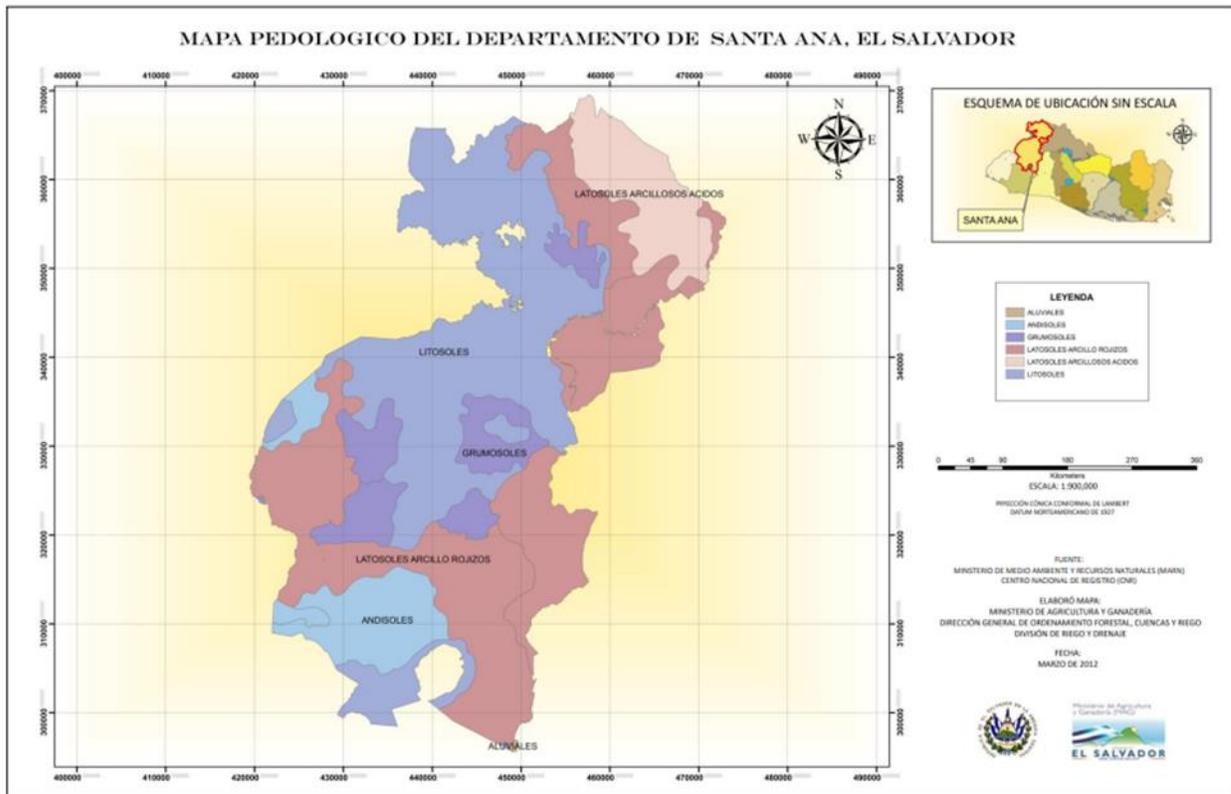
A- 1. Matriz de correlación de variables, empleando el programa RStudio.



A- 2. Procedimiento Químico.

Las muestras de agua, sedimento y suelo fueron secadas y molidas. La determinación analítica de las muestras se llevó a cabo por triplicado (Laboratorio de Química Agrícola, Facultad de Ciencias Agronómicas) en un Analizador Analytikjena N/C 3100. Fundamento: Consiste en la conversión del carbono presente en la muestra sólida por combustión a CO₂, este gas posteriormente es acarreado utilizando oxígeno realizando la detección del CO₂ mediante un detector infrarrojo cercano no dispersivo (NDIR). Se analizaron muestras de agua 5 -10 mL, sedimento y suelo entre 15 y 20 mg y adicionalmente se fijaron los valores de los parámetros analíticos siguientes: Lectura por Espectroscopia Infrarroja no Dispersiva: temperatura del horno: 1,200 °C, detector: módulo de sólidos TOC HT 1300, presión: 2224 mm Hg, tiempo de análisis: 3 segundos, compuesto de calibración: Estándar de Carbonato de Calcio 98%.

A- 3. Mapa de suelos de El Salvador



Mapa tomado de “Clasificación de suelos por división política de El Salvador, C. A.” MAG. 2012.

Litosoles: Suelos de muy poca profundidad sobre roca pura, son suelos muy complejos. La mayoría son suelos cuyos horizontes superficiales han sido truncados a causa de una severa erosión laminar o sea que la erosión ocurre en láminas y no en forma de cárcavas, son suelos arcillosos como los latosoles, pero muy superficiales. Las texturas varían de gruesa, arenas y gravas hasta muy pedregosos sobre la roca dura. El uso potencial es muy pobre de bajo rendimiento. Sin embargo, en algunos lugares muy pedregosos por la gran cantidad de piedras reduce la erosión, por lo cual pudieran generar buenos rendimientos por mata si el cultivo se hace con chuzo.

A- 4. Base de datos contenido de carbono en sedimentos depositados del Lago de Coatepeque.

BASE DE DATOS		LUGAR: COATEPEQUE			MUESTRAS DE SEDIMENTO DEPOSITADOS				
Lugar	Muestra	Sitio	Fecha	Hora	Latitud	Longitud	Profundidad sedimento (m)	% Carbono total TC	CO ₂ Eq.
CT	SF	P1	16/11/2020	10:00	1537015.07	224727.225	15	11.1	40.737
CT	SF	P2	16/11/2020	10:17	1536098.17	223338.474	15	9.7	35.599
CT	SF	P3	16/11/2020	10:48	1534903.63	222322.183	15	10.5	38.535
CT	SF	P4	16/11/2020	11:05	1533949.62	222101.605	15	17	62.39
CT	SF	P5	16/11/2020	11:20	1532915.59	222460.06	15	14.8	54.316
CT	SF	P6	16/11/2020	11:30	1531854.66	222460.692	15	13.3	48.811
CT	SF	P7	16/11/2020	11:45	1531075.18	224035.901	15	17.2	63.124
CT	SF	P8	16/11/2020	12:02	1531780.86	225341.483	15	1.8	6.606
CT	SF	P9	16/11/2020	12:21	1532897.66	226741.47	15	15.8	57.986
CT	SF	P10	16/11/2020	12:33	1534100.14	227310.008	15	24.5	89.915
CT	SF	P1	01/12/2020	10:13	1536930.81	225997.08	15	16.2	59.454
CT	SF	P2	01/12/2020	11:41	1531414.42	223080.98	15	16.9	62.023
CT	SF	P3	01/12/2020	11:55	1531616.31	223467.75	15	12.7	46.609
CT	SF	P4	01/12/2020	12:42	1535108.24	227359.71	15	13.7	50.279
CT	SF	P5	01/12/2020	01:00	1536125.49	227124.12	15	14.4	52.848
CT	SF	P1	22/03/2021	10:20	1536981.54	224699.83	15	14.6	53.582
CT	SF	P2	22/03/2021	10:55	1534921.88	222340.41	15	10.9	40.003
CT	SF	P3	22/03/2021	11:32	1531811.97	222427.18	15	15.5	56.885
CT	SF	P4	22/03/2021	12:08	1531765.49	225341.32	15	12.3	45.141
CT	SF	P5	22/03/2021	12:45	1532958.67	226787.18	15	10.7	39.269
CT	SF	P6	22/03/2021	01:10	1536123.13	227088.26	15	13.3	48.811
CT	SF	P1	26/04/2021	09:59	1537024.39	224718.312	15	12.2	44.774

CT	SF	P2	26/04/2021	10:59	1534842.42	222294.485	15	9.74	35.7458
CT	SF	P3	26/04/2021	11:36	1531699.3	222323.808	15	12	44.04
CT	SF	P4	26/04/2021	11:57	1531783.78	225356.538	15	10.9	40.003
CT	SF	P5	26/04/2021	13:00	1534115.45	227316.178	15	11.3	41.471
CT	SF	P6	26/04/2021	13:13	1535145.13	227360.101	15	12.1	44.407
CT	SF	P7	26/04/2021	13:29	1536141.47	227067.205	15	12.5	45.875
CT	SF	P1	27/05/2021	10:11	1537024.23	224733.331	15	11.9	43.673
CT	SF	P2	27/05/2021	10:35	1534927.81	222361.501	15	12.8	46.976
CT	SF	P3	27/05/2021	11:00	1531781.44	222405.82	15	12.7	46.609
CT	SF	P4	27/05/2021	11:21	1531264.45	226192.368	15	13.4	49.178
CT	SF	P5	27/05/2021	11:34	1531753.41	225320.158	15	8.33	30.5711
CT	SF	P6	27/05/2021	11:59	1534109.31	227316.114	15	12.2	44.774
CT	SF	P7	27/05/2021	12:11	1535145.07	227366.109	15	11.8	43.306
CT	SF	P8	27/05/2021	12:23	1536085.97	227081.639	15	11.3	41.471

A- 5. Base de datos contenido de carbono en agua del Lago de Coatepeque.

Sitio	Fecha	Latitud	Longitud	Prof. m	T °C	pH	Cond. ppm	Transp. (m)	CT ppm	CO2 eq
P1	26/10/2020	1535949.54	225160.483	20	27.7	8.3	899	4.75	56.65	207.9055
P1	26/10/2020	1535949.54	225160.483	1	29.9	8.2	901	4.75	56.84	208.6028
P2	26/10/2020	1534146.31	222972.032	20	27.5	8.3	921	5.6	57.01	209.2267
P2	26/10/2020	1534146.31	222972.032	1	27.8	8.4	916	5.6	58.59	215.0253
P3	26/10/2020	1531440.16	222489.891	10	27.5	8.4	921	5	56.74	208.2358
P3	26/10/2020	1531440.16	222489.891	1	27.8	8.4	919	5	56.39	206.9513
P4	26/10/2020	1532528.11	225051.957	20	27.4	8.3	922	5.4	56.79	208.4193
P4	26/10/2020	1532528.11	225051.957	1	27.8	8.4	919	5.4	57.02	209.2634
P5	26/10/2020	1534222.1	225088.008	20	27.2	8.5	918	5.5	56.69	208.0523
P5	26/10/2020	1534222.1	225088.008	1	27.7	8.4	918	5.5	56.85	208.6395
P1	16/11/2020	1535321.32	222657.161	1	26.1	8.5	926	5.3	57.15	209.7405
P1	16/11/2020	1535321.32	222657.161	20	25.4	8.3	925	5.3	56.97	209.0799
P2	16/11/2020	1534859.97	222378.798	1	26.8	8.4	931	5	57.2	209.924
P2	16/11/2020	1534859.97	222378.798	20	26.1	8.3	924	5	57.23	210.0341
P3	16/11/2020	1531854.66	222460.692	1	26.4	8.4	935	5.7	57.4	210.658
P3	16/11/2020	1531854.66	222460.692	10	26.1	8.3	945	5.7	57.25	210.1075
P4	16/11/2020	1531780.86	225341.483	1	26.1	8.4	930	4.8	56.87	208.7129
P4	16/11/2020	1531780.86	225341.483	20	26.1	8.4	936	4.8	57.26	210.1442
P5	16/11/2020	1532897.66	226741.47	1	26.4	8.4	929	4.8	56.59	207.6853
P6	16/11/2020	1534100.14	227310.008	1	26.1	8.3	932	4.2	56.9	208.823
P1	01/12/2020	1536836.45	224752.36	20	25.2	8.2	942	7	58.05	213.0435
P1	01/12/2020	1536836.45	224752.36	1	25.4	8.2	937	7	57.45	210.8415
P2	01/12/2020	1534863.31	222640.22	20	25.1	8.3	943	6.2	58.78	215.7226
P2	01/12/2020	1534863.31	222640.22	1	25.1	8.3	957	6.2	58.66	215.2822
P3	01/12/2020	1531783.84	222468.95	10	26	8.2	936	5	58.26	213.8142
P3	01/12/2020	1531783.84	222468.95	1	26.1	8.3	935	5	58.25	213.7775

P4	01/12/2020	1531836.21	225342.07	20	25.4	8.4	935	5.5	58.55	214.8785
P4	01/12/2020	1531836.21	225342.07	1	25.6	8.3	936	5.5	58.13	213.3371
P5	01/12/2020	1533156.72	225509.33	20	25.1	8.3	932	6.5	58.49	214.6583
P5	01/12/2020	1533156.72	225509.33	1	25.4	8.3	939	6.5	58.55	214.8785
P1	23/02/2021	1536759.22	224784.58	1	24.2	8.3	932	2.7	61.22	224.6774
P1	23/02/2021	1536759.22	224784.58	10	24	8.3	954	2.7	61.34	225.1178
P1	23/02/2021	1536759.22	224784.58	20	23.6	8.1	953	2.7	60.58	222.3286
P2	23/02/2021	1534795.21	222681.55	1	24.2	8	950	3.5	59.4	217.998
P2	23/02/2021	1534795.21	222681.55	10	24.1	8.4	963	3.5	60.15	220.7505
P2	23/02/2021	1534795.21	222681.55	20	24	8.1	958	3.5	60.66	222.6222
P3	23/02/2021	1531704.06	222453.07	1	24.5	8.1	970	3	60.45	221.8515
P3	23/02/2021	1531704.06	222453.07	10	24.4	8.3	974	3	59.49	218.3283
P4	23/02/2021	1531824.35	225299.88	1	24.6	8.3	963	3	60.45	221.8515
P4	23/02/2021	1531824.35	225299.88	10	24.1	8.2	956	3	60.73	222.8791
P4	23/02/2021	1531824.35	225299.88	20	23.9	8.1	953	3	60.72	222.8424
P5	23/02/2021	1532660.32	225053.36	1	24.4	8.2	957	3	60.25	221.1175
P5	23/02/2021	1532660.32	225053.36	10	24.1	8.2	961	3	60.13	220.6771
P5	23/02/2021	1532660.32	225053.36	20	23.8	8	970	3	60	220.2
P1	22/03/2021	1536680.08	224708.63	1	24.3	8.3	955	5.5	59.31	217.6677
P1	22/03/2021	1536680.08	224708.63	10	24.1	8.2	960	5.5	58.57	214.9519
P1	22/03/2021	1536680.08	224708.63	20	23.9	8.3	1183	5.5	58.86	216.0162
P2	22/03/2021	1534729.11	222536.63	1	24.2	8.2	962	7.3	59.05	216.7135
P2	22/03/2021	1534729.11	222536.63	10	23.4	8.1	961	7.3	58.82	215.8694
P2	22/03/2021	1534729.11	222536.63	20	23.7	8.2	965	7.3	59.04	216.6768
P3	22/03/2021	1531811.97	222427.18	1	25.2	8.3	976	5.2	58.31	213.9977
P3	22/03/2021	1531811.97	222427.18	10	24.7	8.3	963	5.2	59.54	218.5118
P4	22/03/2021	1531871.11	225240.28	1	25.9	8.3	969	5.8	59.24	217.4108
P4	22/03/2021	1531871.11	225240.28	10	24.2	8.2	966	5.8	59.39	217.9613
P4	22/03/2021	1531871.11	225240.28	20	24.2	8.2	969	5.8	60.09	220.5303

P5	22/03/2021	1533506.59	225284.7	1	26.2	8.2	975	5.15	61.82	226.8794
P5	22/03/2021	1533506.59	225284.7	10	24.5	8.3	969	5.15	58.63	215.1721
P5	22/03/2021	1533506.59	225284.7	20	24.1	8.2	962	5.15	60.27	221.1909

A- 6. Base de datos contenido de carbono en suelo del Lago de Coatepeque.

Sitio	Fecha	Latitud	Longitud	Carbono Total (% en peso)	CO2 Eq.
SL1	26/10/2020	1531290.6	224579.11	10.9	40.003
SL1	26/10/2020	1531291.63	224580.78	9.6	35.232
SL1	26/10/2020	1531292.82	224583.364	11	40.37
SL1	26/10/2020	1531294.61	224587.101	17.1	62.757
SL1	26/10/2020	1531296.8	224591.633	14.9	54.683
SL1	26/10/2020	1531299.42	224597.199	13.3	48.811
SL1	26/10/2020	1531302.76	224603.441	15.5	56.885
SL1	26/10/2020	1531307.22	224610.279	13.3	48.811
SL1	26/10/2020	1531312.03	224618.071	16.4	60.188
SL1	26/10/2020	1531317.47	224627.374	28.2	103.494
SL2	17/02/2021	1531994.73	222017.49	10.9	40.003
SL2	17/02/2021	1531997.93	222017.55	10.8	39.636
SL2	17/02/2021	1532000.75	222017.71	11.2	41.104
SL2	17/02/2021	1532003.44	222018.15	14.5	53.215
SL2	17/02/2021	1532006.33	222017.54	12.3	45.141
SL2	17/02/2021	1532008.78	222016.99	13.8	50.646
SL2	17/02/2021	1532010.96	222016.67	13.8	50.646
SL2	17/02/2021	1532013.41	222016.72	15.1	55.417
SL2	17/02/2021	1532015.67	222016.83	14.1	51.747
SL2	17/02/2021	1532018.25	222016.78	11.6	42.572
SL2	17/02/2021	1531991.58	222017.27	10.1	37.067
SL2	17/02/2021	1531988.77	222017.33	9.86	36.1862
SL2	17/02/2021	1531985.69	222017	9.09	33.3603
SL2	17/02/2021	1531981.02	222016.78	8.92	32.7364
SL2	17/02/2021	1531976.34	222016.5	9.9	36.333
SL3	22/03/2021	1532976.71	226826.434	22.1	81.107

SL3	22/03/2021	1532980.51	226827.008	13.4	49.178
SL3	22/03/2021	1532984.68	226827.67	13	47.71
SL3	22/03/2021	1532988.58	226827.521	9.46	34.7182
SL3	22/03/2021	1532991.98	226827.937	12.2	44.774
SL3	22/03/2021	1532995.38	226828.02	12.5	45.875
SL3	22/03/2021	1532998.43	226829.05	10.7	39.269
SL3	22/03/2021	1533001.3	226829.081	13.6	49.912
SL3	22/03/2021	1533003.92	226829.726	11.4	41.838
SL3	22/03/2021	1533007.02	226830.994	11.7	42.939
SL3	22/03/2021	1533009.25	226831.54	11.1	40.737
SL3	22/03/2021	1533012.15	226832.854	10.8	39.636
SL3	22/03/2021	1533014.48	226833.686	10.6	38.902
SL3	22/03/2021	1533017.1	226834.284	11.2	41.104
SL3	22/03/2021	1533019.42	226834.879	10.9	40.003
SL3	22/03/2021	1533022.73	226835.934	10.2	37.434
SL4	26/04/2021	1536129.14	227367.453	12.1	44.407
SL4	26/04/2021	1536126.86	227368.151	10.8	39.636
SL4	26/04/2021	1536124.56	227368.725	10.9	40.003
SL4	26/04/2021	1536122.1	227369.297	10.9	40.003
SL4	26/04/2021	1536120.11	227369.874	13.5	49.545
SL4	26/04/2021	1536117.81	227370.298	10.8	39.636
SL4	26/04/2021	1536115.51	227370.723	10.9	40.003
SL4	26/04/2021	1536112.9	227370.994	10.2	37.434
SL4	26/04/2021	1536110.75	227371.42	9.5	34.865
SL4	26/04/2021	1536108.3	227371.843	10.7	39.269
SL4	26/04/2021	1536106.15	227372.269	9.91	36.3697
SL4	26/04/2021	1536103.88	227372.592	9.96	36.5532
SL4	26/04/2021	1536102.03	227372.948	10.4	38.168
SL4	26/04/2021	1536099.8	227373.375	10.9	40.003

SL5	27/05/2021	1537398.56	224235.642	10.7	39.269
SL5	27/05/2021	1537396.91	224237.401	10.4	38.168
SL5	27/05/2021	1537395.33	224239.034	11.9	43.673
SL5	27/05/2021	1537393.7	224240.642	10.1	37.067
SL5	27/05/2021	1537392.2	224242.178	9.62	35.3054
SL5	27/05/2021	1537390.36	224244.079	10.8	39.636
SL5	27/05/2021	1537388.73	224245.885	10.7	39.269
SL5	27/05/2021	1537386.74	224247.686	10.7	39.269
SL5	27/05/2021	1537384.96	224249.687	10.1	37.067
SL5	27/05/2021	1537382.91	224252.325	9.99	36.6633
SL5	27/05/2021	1537406.86	224266.522	7.92	29.0664
SL5	27/05/2021	1537404.47	224268.516	12	44.04
SL5	27/05/2021	1537402.33	224270.513	9.88	36.2596
SL5	27/05/2021	1537400.61	224272.798	12.5	45.875
SL5	27/05/2021	1537398.2	224275.001	11.6	42.572

A-7. Base de datos contenido de carbono en núcleo de suelo del Lago de Coatepeque.

BASE DE DATOS. LUGAR: COATEPEQUE. MUESTRA NUCLEO DE SUELO						
Lugar	Fecha	Latitud	Longitud	Profundidad suelo (cm)	% Carbono total TC	CO2 Eq
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	32	12	44.04
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	30	10.9	40.003
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	28	10.7	39.269
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	26	10.7	39.269
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	24	10.9	40.003
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	22	11.2	41.104
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	20	12.1	44.407
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	18	14.3	52.481
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	16	14.2	52.114
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	14	13.9	51.013
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	12	12.6	46.242
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	10	11.9	43.673
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	8	11.2	41.104
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	6	11.9	43.673
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	4	13.1	48.077
CT	26/10/2020	1531290.6	224579.11	2	16.3	59.821

A-8. Actividades de fase de campo para muestras de carbono en agua, suelo y sedimentos

