Universidad de El Salvador Facultad de Ciencias Naturales y Matemática Escuela de Física



Trabajo de Graduación

"Levantamiento batimétrico y medición de parámetros físico-químicos en el Lago de Ilopango, El Salvador"

Presentado Por: Irving Alberto Sánchez Esquivel

Para optar al grado de

Licenciado en geofísica

Docente Director

Oscar Armando Amaya

Ciudad Universitaria, 15 de abril de 2016

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

RECTOR INTERINO

Lic. Luis Argueta Antillón

SECRETARIA GENERAL INTERINO

Dra. Ana Leticia Zavaleta de Amaya

FISCAL GENERAL INTERINO

Licda. Nora Beatriz Meléndez

DECANO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

Lic. Mauricio Hernan Lovo

DIRECTOR DE LA ESCUELA DE FÍSICA

M.Sc. Cesar Armando Alvarado Batres

Ciudad Universitaria, abril de 2016

Índice general

Li	Lista de figuras				
Li	sta d	e tabla	as	v	
1.	Intr	oducci	ón	1	
2.	Fun	damen	ntación Teórica	4	
	2.1.	Intro	ducción al levantamiento batimétrico	4	
		2.1.1.	Estudios de profundidad	4	
		2.1.2.	Tipos de levantamientos batimétricos	٢	
		2.1.3.	Sistemas de prospección acústica	Ę	
	2.2.	Caract	terísticas físicas del sonido en el agua	(
		2.2.1.	Intensidad del sonido y amplitud del desplazamiento	(
		2.2.2.	Intensidad y amplitud de presión efectiva	7	
		2.2.3.	Nivel de intensidad del sonido	8	
		2.2.4.	Ecuación del Sonar	8	
		2.2.5.	Refracción y reflexión de las ondas acústicas	Ć	
	2.3.	Caract	terísticas físico-químicas del agua	11	
		2.3.1.	Efectos de la temperatura en el agua	11	
		2.3.2.	Estratificación térmica en lagos tropicales y subtropicales	11	
		2.3.3.	Clasificación de los lagos según su patrón de mezcla	12	
		2.3.4.	Acidificación en Lagos	13	
		2.3.5.	Valores de pH en aguas neotropicales	14	
		2.3.6.	Conductividad eléctrica en lagos	14	
	2.4.	Antece	edentes de la Investigación	15	
		2.4.1.	Estudios batimétricos y físico-químicos en cuerpos de agua continental		
			en El Salvador	15	
		2.4.2	Investigaciones y estudios realizados en el Lago de Ilonango	16	

ÍΝ	IDICE GENERAL	III			
3.	Descripción del área de estudio 3.1. Localización y características de la zona de estudio	18 18 20 20 23			
4.	Metodología 4.1. Diseño experimental	25 28 29 30 34 37			
5.	Discusión y análisis de resultados 5.1. Carta batimétrica del lago de Ilopango	38 38 41 44			
6.	Conclusiones y recomendaciones 6.1. Conclusiones	48 48 49			
Α.	. Levantamiento batimétrico, Lago de Ilopango.	50			
В.	. Mapa batimétrico, Corinto.	51			
$\mathbf{C}.$	C. Mapa batimétrico, Playa Poza Verde. 52				

53

D. Mapa batimétrico, Río Desagüe.

Índice de figuras

1.1.	Volcanes de El Salvador (triángulos sólidos). Volcanes proximales al área metropolitana de San Salvador AMSS (área sombreada): SS = Volcán de San Salvador, LI = Caldera de Ilopango, SV = Volcán de San Vicente	2
2.1.	Refracción y reflexión de un rayo a) El material b presenta mayor índice de refracción que el material a. b) El material b tiene menor índice de refracción que a. c) El rayo incidente es normal a la interfaz entre los materiales. Tomado y modificado de [15].	10
2.2.	Estratificación térmica del lago Meade, Arizona. Tomado de [20]	12
3.1.	Esquema estructural de la zona de estudio. A) Entorno tectónica de América Central. Las flechas indican fallas con principalmente el movimiento de desgarre. Tomado de [28]. B) La caldera de Ilopango se encuentra ubicada entre los departamentos de San Salvador, Cuscatlán y La Paz. El frente volcánico de El Salvador (triángulos sólidos) es régimen transtensivo es generado por el movimiento relativo hacia el oriente de la Placa del Caribe con relación a la de Norteamérica, y el antearco fijado a esta última. C) La zona de estudio se sitúa dentro de la estructura del Graben Central con rumbo WNW-SES, limitando al sur con el sistema de fallas y la Cordillera del Bálsamo. Los volcanes próximos al área metropolitana de San Salvador (AMSS); GU = volcán Guazapa, NE = volcán Nejapa, SS = volcán San Salavador,	
	${\rm LI}={\rm caldera}$ de Ilopango, ${\rm CJ}={\rm caldera}$ Jayaque, P $={\rm plan}$ de la Laguna	19
3.2.	Esquema donde se muestra las relaciones espaciales entre las unidades de roca y tefra en la parte norte-sur del área de estudio. PL (tefras de Plan de Laguna), CA	
	(tefras Congo y Arce), TB (Tierra Blanca). Tomado y modificado de [30]	21
3.3.	Mapa geológico en los contornos de la zona de estudio. Tomado y modificado de [34]	22
3.4.	Registro de miscrosismicidad en la caldera de Ilopango 2004-2011. Tomado y modi-	
	ficado de [36]	23
3.5.	Ubicación de los microsismos registrados en la caldera de Ilopango en el año 2015	
	(puntos en verde) y los sistemas de fallas geológicas locales (lineas en negro). Tomado	
	y modificado de [37]	24

4.1.	Montaje del sonar monohaz en la aleta de estribor midiendo las profunidades en dirección perpendicular al rumbo de la embarcación. La sonda multiparámetros CTD ubicada a estribor, registra la variación de los parámetros físico-químicos en	
	la columna de agua	25
4.2.	Mapa de ubicación y malla de recorridos propuestos para el levantamiento batimétri-	20
1.2.	co con un espaciamiento de 500 metros entre cada linea y los sitios de muestreo de parámetros físico-químicos	26
4.3.	Transductor utilizado para el levantamiento batimétrico, proyecta la energía acústica	0
1.0.	en un haz orientado verticalmente	29
4.4.	Ecosonda de haz simple y transductor de frecuencia dual. Tomado y modificado de	
	[39]	30
4.5.	Diagrama de procesamiento de datos de batimetría con ecosonda monohaz	31
4.6.	Perfilador multiparametros CTD. Tomado y modificado de [40]	36
F 1		
5.1.	Perfiles batimétricos y el alineamiento preferencial en dirección Oeste-Este y Noroeste- Sureste: ICH = Isla Chachagaste, IC = Isla El Cerrón, ICQ = Isla Cerros Quemados,	
	ICP = Isla Cerro Los Patos, ? = domos sin nombre	40
5.2.	Modelo 3D con resolución de dos metros de la topografía de la caldera de Ilopan-	40
0.2.	go. Las estructuras intracaldericas registradas en el levantamiento batimétrico son	
	denominadas: 1. Isla Chachagaste, 2. Sin nombre, 3. Isla Portillo, 4. Isla Cerrón, 5.	
	Isla Los Cerros Quemados, 6. Sin nombre, 7. Isla Cerro Los Patos, 8. Sin nombre.	42
5.3.	Ubicación de las fallas geológicas locales y las estructuras intracaldericas de la	
	caldera de Ilopango. 1. Isla Chachagaste, 2. Sin nombre, 3. Isla Portillo, 4. Isla	
	Cerrón, 5. Isla Los Cerros Quemados, 6. Sin nombre, 7. Isla Cerro Los Patos,	
	8. Sin nombre	43
5.4.	Distribución espacial de los cuarenta perfiles de muestreos (banderas en rojo) de	
	temperatura, conductividad eléctrica, pH y velocidad del sonido	45
5.5.	Variaciones espaciales y temporales de la tempetatura, conductividad eléctrica, ve-	
- 0	locidad del sonido y pH en el Lago de Ilopango	46
5.6.	Variaciones espaciales de la temperatura del lago de Ilopango en enero de 2016	47
B.1.	Levantamiento batimétrico frente a las costa de Corinto	51
C.1.	Levantamiento batimétrico frente a Playa Poza Verde y Cerro El Mono, ubicados	
	en el sector sur de Lago de Ilopango	52
D.1.	Levantamiento batimétrico en la desembocadura del río Desagüe	53

Índice de tablas

3.1.	Ciclo eruptivo de la caldera de Ilopango. Tomado de [30] [32] [4] [3] [33]	20
4.1.	Equipo a utilizar en el levantamiento batimétrico	27
4.2.	Software para la captura, procesamiento y gráfico de datos	27
4.3.	Especificaciones técnicas del instrumento CTD SBE 25 Sealogger. Tomado de	
	$[40] \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	36

Agradecimiento

El desarrollo de ésta investigación se coordino dentro del programa de cooperación institucional del Laboratorio de Toxinas Marinas (LABTOX-UES) con la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), en el marco del proyecto piloto de "Potabilización del Agua del Lago Ilopango, PAPLI", con el financiamiento y cooperación del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) en El Salvador. Agradezco a Dagoberto Arévalo, Miguel Rodríguez, Zobeyda Valencia de Toledo y Douglas García, por sus valiosos aportes logísticos para la adquisición de datos, garantizar el transporte hacia la zona de estudio y proporcionar la embarcación para la toma de datos. De igual manera agradezco al personal técnico de la ANDA, especialmente a Mario Ernesto Flores, José David Galdámez, Luis Alonso Vásquez y Cristián Antonio González, por su valiosa colaboración en diseñar las adaptaciones en la embarcación para instalar los equipos a utilizar, manejo de la embarcación, adquisición y procesamiento de datos.

Agradezco a mi asesor Oscar Armando Amaya, por brindarme su constante apoyo para realizar esta investigación y dar a conocer los resultados obtenidos a nivel nacional y regional.

Agradezco Walter Hernández, Luis Mixco y Demetrio Escobar, investigadores del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por sus valiosos comentarios y sugerencias para la mejora de este documento.

A mis amigos y compañeros de estudio: Aida Lorena Mendieta, Daniel Edgardo Vásquez, Carlos Jonathan Hernández, Yaneth Lisbel Alvarado, Ronald Edgado Torres y Oscar Melara, por sus invaluables aportes en la adquisición de datos y observaciones para la mejora de este documento.

Por ultimo, pero no menos importante, mi Familia y especialmente a mi madre, Marta Esquivel y mis hermanos por su incondicional apoyo.

Resumen

Esta investigación presenta resultados del levantamiento batimétrico exploratorio realizado en el Lago de Ilopango. El objetivo principal es cuantificar las profundidades utilizando la propagación acústica de pulsos generados a partir de un sonar monohaz, para generar una carta batimétrica, un modelo de elevación digital y establecer una linea base del régimen de estratifición físico-químico de la columna de agua, como herramienta para establecer futuros programas de monitoreos y caracterización del Lago de Ilopango. En este trabajo se registro la profundidad en 279.148 puntos separados cada tres metros y distribuido en una malla 36 perfiles que permitieron identificar siete estructuras intracaldéricas, probablemente asociados a los últimos cuatro episodios eruptivos. Por otra parte, las zonas mayor profundidad se registraron principalmente al oeste las Islas Cerros Quemados, frente a las Puntas La Península y Tenango, con profundidades máximas de 235.9±4.7 m y un volumen estimado de 9.97km³. El modelo 3D de la caldera, refleja una morfometría con un fondo considerablemente plano y grandes pendientes en las orillas. Por otra parte, los resultados observacionales a partir de los cuarenta perfiles que conformaron la malla de medición de la temperatura, conductividad y pH, indican que las variaciones espaciales y temporales en la columna de agua producto calentamiento del agua superficial se propaga hacia las capas más profundas favoreciendo la estratificación térmica directa que teniendo un papel importante en la regulación de la mezcla vertical en el lago. Los valores de pH son relativamente estables entre 8.0 a 8.8; los máximos observados de 9.7, posiblemente relacionados a la actividad fotosintetica del fitoplancton en los meses de mayo a junio, cuando ocurre la proliferación de microalgas, cambiando la tonalidad del agua de lago. El contenido promedio de sales disueltas fue medido por intermedio de la conductividad eléctrica realizadas en 15 perfiles de 160 m de profundidad. En superficie en marzo de 2015 a 26°C, los valores registrados fueron de 1.9185 μ S.cm⁻¹, 2.0479 μ S.cm⁻¹ en 12 perfiles en mayo de 2015 y 1.9108 μ S.cm⁻¹ en 13 perfiles en Enero de 2016.

Capítulo 1

Introducción

El Lago de Ilopango en El Salvador, Centroamérica, está ubicado a una altura de 450 m.s.n.m., en las coordenadas geográficas centrales 13°40.204'N, 89° 3.014'W (ver figura 1.1) forma parte de los 59 humedales del país y uno de los principales ecosistemas de relevancia Nacional debido a sus características únicas e innumerables beneficios que brinda a la población, desde suministro de agua dulce, alimentos, materiales de construcción, biodiversidad, recarga de aguas subterráneas, entre otros [1].

Por otra parte, el lago se encuentra emplazado en el centro magmático activo de mayor extensión de la región Centroamericana. Los estudios geológicos evidencian que la caldera de Ilopango posee un historial eruptivo de más de 2 Ma, presentando diversos episodios eruptivos, el más estudiado corresponde a los últimos 25,000 años, durante el que se produjeron, al menos cuatro erupciones explosivas de tipo freatoplinianas-plinianas con volúmenes entre 1 a 70 km³ [2] [3] [4].

Las erupciones de la caldera de Ilopango han sido acompañadas por un volcanismo monogenético intra y pericaldérico de composición basáltica, andesítica y dacítica-riolítica, que refleja un quimismo que con frecuencia evoluciona. En los alrededores de la caldera y en su interior se han registrado cerca de 35 estructuras volcánicas de ese tipo. Entre los domos que tienen emplazamiento intracaldérico cuyas cimas sobre salen del lago están las islas Chachagaste, Cerrón, Portillo, Cerro Cutenama, Los Patos, y Punta del Toro. Además, otros se han emplazado en el borde sur del lago: El Mono, Tuligo y Cuyultepe. [2][5]. Las Islas Quemadas corresponde a la última erupción efusiva de esta caldera, que ocurrió entre diciembre de 1879 a marzo de 1880. Se trata de un domo dacítico que yace en la parte central del lago y cuya parte sumital emergió hasta 40 m sobre el nivel del lago el 23 de enero de 1880 y en la actualidad se observan como bloques rocosos que sobresalen hasta 10 m sobre el nivel del lago [2] [6]. En la actualidad una erupción con características similar a las ocurridas en el pasado tendría

grandes impactos a escala global y principalmente a la creciente área metropolitana de San Salvador (AMSS) que constituye el centro direccional del país en materia política, financiera, económica y cultural, donde habitan más de 1.5 millones de personas [7] distribuidas entre el flanco oriental del volcán de San Salvador y el flanco occidental de la caldera de Ilopango [8].

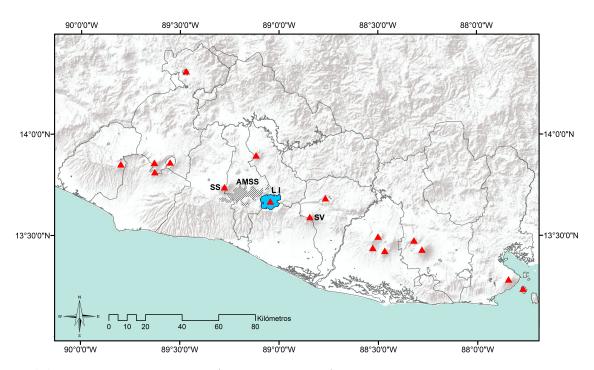


Figura 1.1: Volcanes de El Salvador (triángulos sólidos). Volcanes proximales al área metropolitana de San Salvador AMSS (área sombreada): SS = Volcán de San Salvador, LI = Caldera de Ilopango, SV = Volcán de San Vicente.

El presente trabajo de graduación se enfoca en cuantificar las profundidades actuales del lago, utilizando la propagación acústica de pulsos generados a partir de un sonar monohaz, para generar una carta batimétrica y un modelo de elevación digital de carácter exploratorio y establecer una linea base del régimen de estratificación físico-químico de la columna de agua, como herramienta para establecer futuros programas de monitoreos y caracterización del Lago de Ilopango. Este tipo de información es fundamental para la comprensión de la dinámica de los fenómenos asociados a dichos ambientes y un incentivo para el fortalecimiento de las políticas ambientales orientadas al manejo, gestión y preservación de los ecosistemas. Se espera que este documento sirva de consulta, referencia y orientación para el personal de las instituciones gubernamentales y municipales, titulares de actividades de obras ó proyectos, prestadores de servicios ambientales y para todo aquel con interés en el tema.

Capítulo 2

Fundamentación Teórica

En este capítulo consta de las siguientes partes: 1. Introducción al levantamiento batimétricolos que describe los tipos de levantamientos e instrumentación acústica. 2. Descripción de las características físicas del sonido en el agua, intensidad del sonido, amplitud de presión efectiva, nivel de intensidad del sonido, ecuaciones que describen el funcionamiento de la instrumentación acústica y leyes de refracción y reflexión de Snell. 4. Antecedentes de la investigación.

2.1. Introducción al levantamiento batimétrico

2.1.1. Estudios de profundidad

Los estudio de profundidades han sido desarrollados desde siglo XIII, principalmente para obtener rutas de navegación seguras para las embarcaciones [10]. En la actualidad el conocimiento de las profundidades posee múltiples aplicaciones, partiendo de la seguridad para el transporte marítimo, obras de ingeniería costera (instalación de estructuras, construcción de muelles, dragados, etc.), exploración científica de los recursos naturales, protección del ecosistema, verificar cambios geomorfológicos en las estructuras subacuáticas, defensa marítima, turismo, entre otros [10] [11].

La batimetría es la técnica asociada al levantamiento del relieve de superficies subacuáticas. Ésta puede ser de tipo marina, lacustre o fluvial. La hidrografía describe las características de los fondos acuáticos y representar los valores de profundidad en un mapa denominado carta náutica.

2.1.2. Tipos de levantamientos batimétricos

Los levantamientos batimetricos varían respecto a la cobertura y precisión; por tal motivo, se definen cuatro tipos de levantamientos [11]:

- Precisión: Determina y corrobora las profunidades del área de estudio. Se utiliza en la construcción de obras de ingeniería, control de calados de operación, tendido de cables, u otras actividades que necesiten un detalle fino del sector.
- Exploratoria: Cuando se desea conocer las características de la configuración del fondo lacustre ó marino para evaluar la factibilidad de ejecutar obras de ingeniería o establecer posibles rutas de navegación.
- Navegación: Su objetivo es garantizar la seguridad para la navegación, esto requiere cartografiar con precision las estructuras subacuáticas que representen un potencial peligro para las embarcaciones.
- **Prospección:** Aquella que se realiza con la finalidad de obtener un muestreo de profundidades, con el objetivo de servir de apoyo a otro trabajo que se esté llevando a cabo en el área involucrada.

2.1.3. Sistemas de prospección acústica

La observación de las estructuras de los fondos acuáticos no puede realizarse a gran escala de forma directa; por lo que es necesario recurrir a métodos indirectos utilizando instrumentación acústica, los cuales se basan en el registro mediante la emisión/recepción de ondas acústicas que ensonifican el fondo acuático.

Los dispositivos para detectar de forma remota y la localización de objetos en ambientes acuáticos se llaman **sonar** ó **ecosonda**. Los dos tipos básicos de sonar son:

- Sonares pasivos: son dispositivos que esencialmente escuchan y registran los sonidos emitidos por los objetos en el agua. Tales instrumentos pueden ser utilizados para detectar eventos sísmicos, barcos, submarinos, y las criaturas marinas, cualquier cosa que emite sonido por sí mismo.
- Sonares activos: son dispositivos que producen ondas sonoras de frecuencias específicas, controladas, y escuchan los ecos de estos sonidos emitidos regresado de objetos remotos en el agua siendo posible calcular su distancia respecto a la fuente de emisión.

En este documento sólo se analiza los dispositivos de sonar activos utilizado para medir la profundidad del fondo del lago, un proceso llamado eco sondeo o medición batimetría.

2.2. Características físicas del sonido en el agua

Para comprender el funcionamiento de los sonares, primero hay que entender cómo se mueve de sonido en el agua. El sonido viaja en el agua en una serie de frentes de presión en movimiento, conocidas como onda de compresión. Estos frentes de presión se propagan a una velocidad específica en el agua, denominada **velocidad local del sonido** (v) puesto que depende de la salinidad, la presión y la temperatura, pero es independiente de las características del sonido [12].

La distancia física entre frentes de presión en una onda de sonido que viaja es su **longitud** de onda (λ) . El número de frentes de presión que pasan por un punto estacionario en el agua por unidad de tiempo es la **frecuencia de la onda** (f). Longitud de onda, si se mide en metros (m), y la frecuencia, si se mide en ciclos por segundo (Hz) [13], están relacionados entre sí a través de la velocidad del sonido, que se mide en metros por segundo (m/s):

$$v = \lambda * f \tag{2.1}$$

En un fluido, el movimiento de las partículas es un lado a otro, es paralelo a la dirección de propagación; porque el fluido es compresible, este movimiento de vaivén provoca cambios en la presión que pueden ser detectados por el **hidrófono**, que mide el tamaño de estas oscilaciones, es decir, la **amplitud de la onda** (A) [12]. En una onda plana de sonido, la presión (p) se relaciona con la velocidad de las partículas de fluido por

$$p = \rho * v \tag{2.2}$$

donde ρ es la densidad del fluido y v es la velocidad de la propagación de la onda. Este factor de proporcionalidad se denomina **resistencia acústica específica del fluido**.

2.2.1. Intensidad del sonido y amplitud del desplazamiento

Las ondas sonoras, transfieren energía de una región del espacio a otra, una forma útil de describir la energía transportada por un sonido es con la **intensidad de la onda** (I), que es igual a la rapidez media con que la onda transporta energía, por unidad de área (a), a través de una superficie perpendicular a la dirección de propagación [13].

$$I = \frac{Potencia}{unidad\ de\ area} \tag{2.3}$$

La potencia es el producto de la fuerza (F) por la velocidad (v). Por lo tanto, la potencia por unidad de área en esta onda sonora es igual al producto de la presión p(x,t)(fuerza por unidad de área) por la velocidad de la partícula, v(x,t).

$$I = p(x,t) * v(x,t) \tag{2.4}$$

donde la velocidad v(x,t) de las partículas en el fluido y la presión acústica p(x,t) es

$$v(x,t) = \frac{\partial \psi}{\partial t} = A\omega Sen(\kappa x - \omega t)$$
 (2.5)

$$p(x,t) = -B_s \frac{\partial \psi}{\partial x} = AB_s \kappa Sen(\kappa x - \omega t)$$
 (2.6)

donde la cantidad AB_s κ representa la máxima fluctuación de presión, denominada amplitud de presión (P_{max}), B_s es el modulo de compresibilidad, la velocidad del sonido en un fluido esta relacionada por $v = B_s^2/\rho_0$, y $\kappa = \omega/v$ [13]. Al sustituir la ecuación 2.5 y 2.7 en 2.4 donde se obtiene

$$p(x,t)v(x,t) = A^2 B_s \omega \kappa Sen^2(\kappa x - \omega t)$$
(2.7)

La intensidad de una onda sonora senoidal es, por definición, el valor promedio de p(x,t)v(x,t). Para cualquier valor de x, el valor medio de la función $Sen^2(\kappa x - \omega t)$ durante un periodo $T=2\pi/\omega$ es 1/2 [13], por lo tanto

$$I = \frac{1}{2} B_s \omega \kappa A^2 \tag{2.8}$$

$$I = \frac{1}{2}\sqrt{\rho_0 B_s} \omega^2 A^2 \tag{2.9}$$

2.2.2. Intensidad y amplitud de presión efectiva

Por lo general la intensidad de una onda se expresa en términos de la amplitud de presión (P_{max}) [13], utilizando la relación $\omega = v$, κ y $v^2 = B_s/\rho_0$ en la ecuación 2.8.

$$I = \frac{\omega P_{max}^2}{2B_s \kappa} = \frac{v P_{max}^2}{2B_s} \tag{2.10}$$

$$I = \frac{P_{max}^2}{2\nu\rho_0} \tag{2.11}$$

Los instrumentos de medición de sonido están diseñados para medir la presión sonora efectiva P_e o RMS (raíz media cuadrada), lo cual significa que las presiones sonoras instantáneas en un intervalo de tiempo son primero elevadas al cuadrado luego promediadas y finalmente extraídas de la raíz cuadrada del promedio [10].

$$P_e = \frac{P_{max}}{\sqrt{2}} \tag{2.12}$$

2.2.3. Nivel de intensidad del sonido

Dado que el oído es sensible a una amplia gama de intensidades, suele usarse una escala de intensidad logarítmica. El **niveles de intensidad del sonido** (β) de una onda sonora [13], esta definido por

$$\beta = 10log\left(\frac{I}{I_0}\right) \tag{2.13}$$

donde I_0 es la intensidad de referencia que se toma como 10^{-12} W/m², aproximadamente el umbral de audición humana a 1000 Hz [13]. Los niveles de intensidad de sonido se expresan en decibeles (dB).

2.2.4. Ecuación del Sonar

La ecuación del sonar es una relación empírica usada para estudiar y expresar la capacidad de detección y el desempeño de los ecosondas como una función de las condiciones de operación [14] relacionando los efectos del medio, el objetivo, y el equipo, en conjunto se denominan **parámetros de la sonda**. Las ecosondas define la señal o detección del eco como el **Exceso de Eco** (EE).

$$EE = SL - 2TL - (NL - DI)$$

$$(2.14)$$

Donde SL = nivel de origen, TL = pérdida de la transmisión, NL = nivel del ruido, DI = índice de directividad.

Niveles de Origen (SL) es el nivel de intensidad de la señal acústica en referencia a la intensidad de una onda plana, para el punto localizado a un metro de la distancia del centro de la fuente [14] y se define como:

$$SL = 10Log\left(\frac{I}{I_r}\right) \tag{2.15}$$

Pérdida de Transmisión(TL) es el parámetro que describe cuantitativamente el debilitamiento del sonido entre un punto situado un metro de distancia de la fuente y otro punto lejano [14]. Más específicamente, si I_1 es la intensidad en el punto de referencia ubicado un metro desde el *centro acústico* de la fuente ($10logI_1$ es el nivel de fuente) y I_2 es la intensidad en un punto distante, entonces la pérdida de transmisión entre el origen y el punto distante es:

$$TL = 10Log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \tag{2.16}$$

Al tomar en cuenta las pérdidas de intensidad acústica debido a la geometría (para este caso una dispersión esférica), es decir, de las pérdidas por dispersión es proporcional a r^2 en una medio sin perdidas y homogéneo, la potencia es igual al área por la intensidad

$$P = 4\pi r_1^2 I_1 = 4\pi r_2^2 I_2 \dots (2.17)$$

Si se toma como r_1 a un metro de distancia, la pérdida de transmisión en r_2 esta dada por

$$TL = 10Log(r_2^2) \tag{2.18}$$

$$TL = 20Log(r_2) \tag{2.19}$$

entonces la pérdida de transmisión incluyendo las pérdidas debido a la absorción, proporcionales al coeficiente de absorción, dependiendo de las propiedades físicas y químicas del agua y de la frecuencia acústica [10], está dada por

$$TL = 20Log(r_2) + \alpha r \tag{2.20}$$

donde r es la distancia al transductor y α es el coeficiente de absorción.

Nivel de Ruido (NL) es dependiente del nivel de ruido del espectro ambiental (N_0) y del ancho de banda del transductor durante la recepción (w)

$$NL = N_0 + 10Log(w) (2.21)$$

El ruido en el océano es generado a través de varias fuentes [14], tales como: las olas, la lluvia, la actividad sísmica, el ruido térmico, los organismos vivientes y los hechos por el hombre.

2.2.5. Refracción y reflexión de las ondas acústicas

Una onda acústica que se propaga en agua, se ve interrumpida por un cambio repentino en el medio, como roca o arena, se produce un cambio en su dirección. Dicho fenómeno es llamando **Refracción** y es causado por el cambio de velocidad de propagación de la onda al incidir sobre otro medio diferente [15] y se describe de la siguiente manera.

$$\frac{\sin(\theta_a)}{\sin(\theta_b)} = \frac{n_b}{n_a} \quad (Ley \ de \ refraccion) \tag{2.22}$$

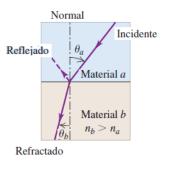
El cambio de dirección de un rayo o una onda que ocurre en la superficie de separación entre dos medios, de tal forma que regresa al medio inicial, se denomina **Reflexión**. Donde el angulo de reflexión (θ_r) medidos a partir de la normal a la superficie, es igual al ángulo de incidencia (θ_a) para todas las longitudes de onda y para cualquier par de materiales [15]. Dicha relación de expresa de la siguiente manera.

$$\theta_r = \theta_a \quad (Ley \ de \ reflexion)$$
 (2.23)

Estos fenómenos puede ser descrita por una relación equivalente a la **Ley de Snell** [16], la cual describe la reflexión y refracción de los rayos de luz a través de diferente indice de refracción, como se muestra en la figura 2.1.

a) Un rayo que entra a un material con *mayor* índice de refracción se desvía *hacia* la normal.





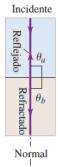


Figura 2.1: Refracción y reflexión de un rayo a) El material b presenta mayor índice de refracción que el material a. b) El material b tiene menor índice de refracción que a. c) El rayo incidente es normal a la interfaz entre los materiales. Tomado y modificado de [15].

Si la interfaz es rugosa, tanto la onda refractada y la reflejada se dispersara en varias direcciones y no hay un ángulo único de trasmisión o reflexión. La reflexión dispersa a partir de una superficie áspera se denomina **reflexión difusa** [15].

2.3. Características físico-químicas del agua

2.3.1. Efectos de la temperatura en el agua

La incidencia de la energía solar sobre los cuerpos de agua continental produce una diferencia de temperatura con respeto a aguas mas profundas. Las diferencias de temperatura originan capas con diferentes densidades que constituyen en sí mismas una barrera física a la mezcla. Si la energía del viento no es suficiente para mezclar el agua, la energía térmica no se redistribuye en la columna de agua y se crean condiciones de estabilidad térmica con estratos diferenciados desde los puntos de vista físicos, químicos y biológicos [17].

La efectividad el viento como agente mezclador no depende solo de su fortaleza, sino también depende de su dirección con relación a la orientación del lago, su ángulo de entrada, la topografía circundante del lago [18]. El términos de trabajo del viento, esto significa que para desestratificar (homogenizar) masas de agua con temperaturas entre 24 a 25 °C, por ejemplo, es necesario que el viento realice un trabajo 31 veces mayor que el efectuado entre temperaturas de 4 y 5 °C. Este fenómeno tiene enormes consecuencias limnológicas, ya que en ecosistemas acuáticos con altas temperaturas (mayores 20 °C), no hay necesidad de grandes diferencias en las capas sucesivas para que ocurra una estratificación térmica de la columna de agua. Por consiguiente, en lagos tropicales y subtropicales se generan estratificaciones térmicamente estables con diferencias reducidas de temperatura entre las capas de la columna de agua. [17].

2.3.2. Estratificación térmica en lagos tropicales y subtropicales

La estratificación térmica en los lagos crea diferencias de densidades que tiene un papel importante en la regulación de mezcla vertical. La mezcla vertical a su vez regula la distribución de los iones químicos y de las partículas en suspensión, incluyendo el fitoplancton, con respecto a la profundidad. Debido a la atenuación relativamente rápida de la luz en profundidad, la fotosíntesis se realiza solamente en aguas superficiales.

La estratificación térmica en un lago se divide en tres regiones como resultado de dos fuerzas opuestas: el viento que busca que el agua se mezcle y homogenice, y el sol que quiere que el agua se estratifique y estabilice, es decir, forme capas de diferentes densidades. Cuando el sol predomina se crea un estructura vertical; cuando es el viento quien domina dicha estructura desaparece total o parcialmente [18].

La estructura vertical esta conformada por una región superficial vigorosamente mezcla-

da por el viento y de temperatura mas o menos uniforme que se denomina **epilimnion** o zona de continuidad térmica, rica en oxigeno proveniente del intercambio gaseoso y de la fotosíntesis; una región más fría, de agua más densa, poco afectada por el viento y el oxígeno se agota por procesos de descomposición del material particulado que caen del epilimnion se denominada **hipolimnion**. Separado de estas dos regiones del lago hay una zona transicional intermedia donde la temperatura cae rápidamente con la profundidad llamada **metalimnion** o mesolimnion ([18]. Dentro de esta zona hay una región donde el gradiente de temperatura se origina es mas pronunciado de denomina **termoclina** [19]. Ver figura 2.2.

Cuando el proceso de estabilidad es duradero, la descomposición de material orgánico, origina compuestos como dióxido de carbono, nitratos, nitritos, fosfatos, sulfatos, etc , los cuales pueden ser tóxicos en altas concentraciones.

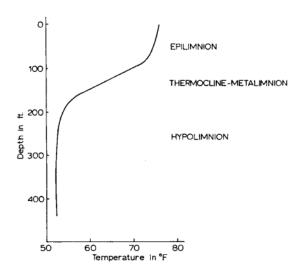


Figura 2.2: Estratificación térmica del lago Meade, Arizona. Tomado de [20].

2.3.3. Clasificación de los lagos según su patrón de mezcla

La clasificación de los lagos tropicales es de importancia la estacionalidad, la cual a pesar de ser comparativamente baja en los trópicos, existe en función de ciclos anuales definidos que afectan la temperatura del aire, la fuerza del viento, la humedad, y la pluviosidad [21]. En los lagos, estos ciclos meteorológicos regulares inducen patrones anuales que en los últimos años han sido ampliamente demostrados [18]. La revisión presentada por Lewis no introduce

cambios en la terminología ni en los conceptos de la clasificación original, pero remedia en buena parte las deficiencias. La clasificación propuesta es la siguiente:

- Amícticos: lagos siempre cubiertos por hielo.
- Monomícticos fríos: lagos cubiertos de hielo la mayor parte del año, libres durante la estación cálida. La temperatura no supera los 4 °C.
- Polimícticos fríos continuos: lagos cubiertos de hielo la mayor parte del año, excepto en la estación cálida, pero encima de 4°C y estratificación casi diaria.
- Polimícticos fríos discontinuos: lagos cubiertos de hielo solo durante parte del año, libres de hielo cuando alcanzan temperaturas por encima de 4°C; estratificación durante la estación cálida, pero períodica de varios días a semanas, pero con intervalos de interrupción por mezcla.
- Dimícticos: lagos cubiertos de hielo parte del año; estratificación estable solo parte del año; pero con mezclas en las transiciones entre estos dos estados.
- Monomícticos cálidos: lagos nunca cubiertos de hielo; estratificación estable parte del año; mezclados una vez por año.
- Polimícticos cálidos discontinuos: lagos que nunca presentan una cubierta de hielo; estratificados por días o semanas, pero mezclándose mas de una vez por año.
- Polimícticos cálidos continuos: lagos sin cubierta de hielo; estratificados durante pocas horas.

2.3.4. Acidificación en Lagos

El pH está intimamente relacionado con los cambios de acidez y basicidad. La base de este concepto es la abreviatura para representar *potencial de hidrogeniones* (H⁺) e indica la concentración de estos iones en el agua [18]. La notación pH expresa la intensidad de la condición ácida o básica de una solución.

La p del pH se refiere al potencial de actividad del H⁺. Por lo tanto una reacción ácida, la mayor actividad del H⁺ aumenta el potencial desde la neutralidad (10^{-7} o pH = 7) hasta, por ejemplo, 10^{-4} (pH=4). En reacciones de pH básico, la actividad del H⁺ disminuye desde la neutralidad hasta, por ejemplo, 10^{-10} (pH=10)[18].

El pH se define como el logaritmo en base 10 del recíproco de la molaridad de los hidrogeniones y se expresa matemáticamente como

$$pH = Log_{10} \frac{1}{H^+} \tag{2.24}$$

2.3.5. Valores de pH en aguas neotropicales

Los valores de pH en ecosistemas neotropicales varía entre 6,0 a 9,0. Los pagos naturales de altas montañas presentan pH entre 6,5 y 7,5, con excepción de lagos en los páramos andinos, que registran valores de 4,0 y 5,0. Los lagos y ciénagas de las partes bajas tropicales exhiben rangos de pH mas amplios (5,0 a 9,0) dependiendo del estado trófico y su alcalinidad [18].

En cuerpos de agua continental con estratificación térmica, química e hidráulica por periodos prolongados de retención de agua, los valores de pH pueden varia con la profundidad en mas de una unidad entre la superficie y fondo [18].

La Organización Mundial para la Salud (OMS) no propone ningún valor de referencia para el pH basado en efectos sobre la salud. Aunque el pH no suele afectar directamente a los consumidores, es uno de los parámetros operativos más importantes de la calidad del agua. No obstante la Normativa Salvadoreña Obligatoria NSO para el Agua y Agua Potable los limites permisibles deben ser entre 6.0 y 8.5. El Decreto Ejecutivo Nº 51 establece la normas deseables para aguas crudas superficiales que solamente requieren sistemas convencionales de tratamiento los rangos de pH 6.5 - 9.2. Los valores de la normas de calidad deseables en aguas para propagación piscícola son de 6.5 - 8.6.

2.3.6. Conductividad eléctrica en lagos

La medida de conductividad de un cuerpo de agua es uno de los parámetros más importantes en limnología. Por medio de la conductividad se conoce información muy valiosas acerca del ecosistema; dentro de estas se destaca: a) la magnitud de la concentración de iónica; los iones responsables de la conductividad son los macronitrientes; b) la variación diaria de la conductividad proporciona información acerca de la productividad primaria y descomposición de materia orgánica; c) la detección de fuentes de contaminación; d)la naturaleza geoquímica del terreno [18].

La dinámica de los ecosistemas acuáticos varía con la naturaleza de los iones que contiene la solución; por ello, aguas con diferente composición iónica mostrarán una relación variable entre concentración iónica y conductividad [18]. Los valores habituales de conductividad son menores a 50 μ Scm⁻¹ en aguas con bajo contenido iónico y desde 500 hasta 2000 μ Scm⁻¹

para las fuertemente mineralizadas [17]. En aguas con pH menor que 5, el ion H⁺ es el principal responsable de los valores altos de conductividad; en aguas básicas con pH mayor que 9, es el OH⁻ quien más contribuye a los altos valores de conductividad [17].

2.4. Antecedentes de la Investigación

2.4.1. Estudios batimétricos y físico-químicos en cuerpos de agua continental en El Salvador

Instituto Geográfico Nacional en 1970-1980 con asistencia del Servicio Geodésico Interamericano y de la Oficina Naval Oceanográfica de los EE.UU. realizaron la primer carta náutica en lago de Ilopango a una escala de 1:20,000. La máxima profundidad registrada fue de 231 metros. Además reportan la calidad físico-química del agua del lago, destacando el alto contenido de boro de 9.8 ppm, pH de 8.46, alto contenidos de cloruros con 382.0 ppm [5].

Lopéz, L. 2008 realizó un estudio limnológico del lago de Güija, determinando su estado de eutrofizción. Presentando una carta batimétrica del lago a partir de la medición de la profundidad en 14 estaciones de monitoreo; ademas determino el comportamiento espacial de parámetros físico-química en la columna de agua en un ciclo anual [22].

García, l. y Zamora, J., 2010 realizaron un estudio batimétrico del Lago de Coatepeque utilizando instrumentación acústica. Los resultados obtenidos a partir de 13 perfiles de profundidad orientados en dirección noroeste-sureste, una mapa batimétrico y un modelo 3D a escala 1:30,000 del fondo de la caldera utilizando instrumentación acústica monohaz [23].

El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales en 2014, realizaron un modelo digital batimétrico de la Laguna de Olomega utilizando ecosonda monohaz. Los resultados obtenidos son una mapa de profundidades y un modelo 3D registrando una profundidad máxima de 63.5 m

Rosales, S. 2015 presenta el informe final sobre la asistencia técnica para capacitación del personal de ANDA y LABTOS-UES en aspectos prácticos de batimetría, caso de estudio batimetría del Lago de Ilopango. Estableciendo los requerimientos, observaciones y recomendaciones en las actividades en terreno. Ademas presenta un análisis de los resultados obtenidos durante la capacitación del personal técnico de ambas instituciones.

2.4.2. Investigaciones y estudios realizados en el Lago de Ilopango

Las investigaciones y estudios realizados en la caldera de Ilopango han sido principalmente orientadas a los materiales volcánicos del último ciclo eruptivo, pero son escasas las investigaciones orientadas al conocimiento sucinto de la superficie del fondo de la caldera y el comportamiento de algunas variables físico-químicas del lago.

Sapper, C. 1925 realizo un estudio sobre los volcanes de la américa central recopilando datos desde los años de 1888 hasta 1924 incluyendo un resumen cronológico de la erupción de 1880 en el volcán de Ilopango que dio origen a las Islas Cerros Quemados descrita en tres fases. La primera fase consta de un periodo de actividad sísmica alrededores de Ilopango desde 1865, 1873 y un fuerte terremoto en 1879. La segunda fase describe un aumento en el nivel del lago, el cual produjo inundaciones en el pueblo de Atuscatla, asociado al domo que emergía desde el centro del lago que sobresalía 40 metros sobre el nivel del lago. La tercera fase de la erupción en 1880 asociado con violentas explosiones de vapor y ceniza. Hasta marzo de 1884 observaron manifestaciones de actividad volcánica, luego la caldera de Ilopango regreso a su periodo de pasividad [6].

Meyer-Abich et. al 1953 estudio el origen del lago de Ilopango, deduciendo que la causa del hundimiento no fue por el vaciamiento de la cámara magmática, tal como lo sucedido en otras grandes calderas, como las de los volcanes Krakatoa, Santorini y el Crater Lake en Oregon. En el caso de Ilopango los volúmenes de cenizas y pómez eyectadas no equivalen al tamaño de la depresión y estas fueron acumuladas durante un largo periodo de tiempo. La depresión tiene una componente volcánica, pero lo esencial es probablemente tectónico, es decir, por el movimiento de la corteza terrestre, la configuración del hundimiento está controlado por líneas de debilidad que delimitaron el graben central, por lo cual estima conveniente clasificar el lago de Ilopango no como una caldera sino como una depresión vulcano-tectónica [24].

Mathieu R. et al, 2004 estudio la inyección de magma máfico en la caldera de Ilopango efectuando un análisis petrográfico y químico para comprender la relación entre los diferentes componentes de las rocas de las Islas Quemadas. Como resultado obtuvo un modelo secuencial de la erupción de 1880, . La presencia de magma máfico tanto en la erupción de 429 d. C. como en la erupción de 1880, indica que este proceso es de importancia general su historia eruptiva [25].

Jiménez, I. et. al 2004, Realizo un inventario nacional y diagnóstico de los humedales de El Salvador (INDHES). En el inventario se considera el lago de Ilopango como un humedal de la cadena volcánica reciente de importancia nacional por sus características únicas y los bines y servicios para la población [1].

Hernández, W. 2008 realizó un estudio sobre los aspectos geológicos e influencia en las aguas subterráneas y en los sismos en el área metropolitana de San Salvador (AMSS). Siendo uno de los aspectos más relevantes la descripción de la distribución espacial y temporal de los distintos materiales volcánicos desde la fuente de emisión incluyendo el último ciclo eruptivo de la caldera de Ilopango [26].

Hernández, W. 2015 realizó un estudio sobre el volcanismo monogenético en el noreste de la Caldera de Ilopango: Cono Peña Colorada, domo La Pilona y domo Buena Vista. El Salvador. Entre los resultados obtenidos destaca las características físico-químicas sugieren que estas lavas no fueron extruidas de forma continua, sino que hubo un periodo de relativa calma entre ellas y un magma que evoluciona. Por otra parte, los depósitos de la erupción subacuática indican un nivel de agua era ~ 43 m más alto que el actual nivel[2].

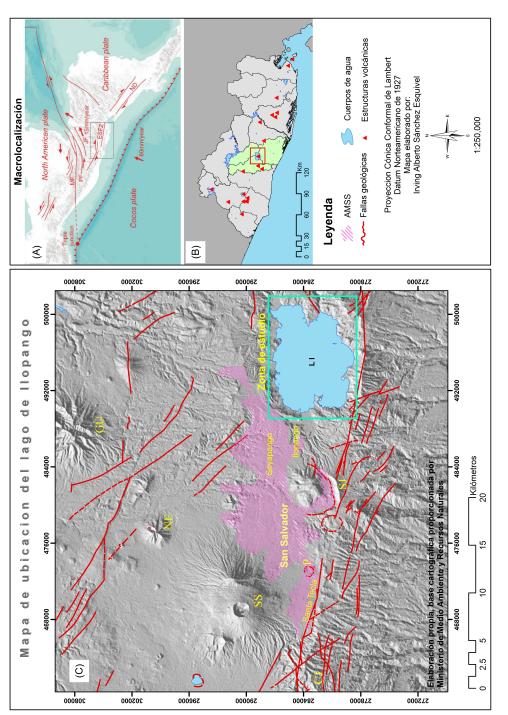
Capítulo 3

Descripción del área de estudio

3.1. Localización y características de la zona de estudio

La caldera de Ilopango emplazada a una altura de 438.53 m.s.n.m. [5] en las coordenadas geográficas centrales 495,062 m E, 282,974 m N [1] entre los departamentos de San Salvador, Cuscatlán y La Paz. La caldera forma parte del frente volcánico de Centroamérica (FVCA). Este frente volcánico es el resultado de la subducción de la Placa de Cocos debajo de la Placa del Caribe y está localizada dentro de una estructura regional denominada depresión central o graben [8] con rumbo preferencial WNW-SES [24] [27]. Ver figura 3.1. En la parte central del arco volcánico donde se encuentra el Area Metropolitana de San Salvador (AMSS) que aglomera 14 municipios con más del 30 % de la población de El Salvador [8].

La depresión irregular de la caldera aloja el lago de origen volcánico de mayor extensión en el país con un área de 70.5 km², [8] [25] y una profundidad máxima reportada de 230 m [5]. El lago está controlado por una compuerta del canal que conecta con el río El Desagüe en la parte oriental. Al sur de la zona de estudio se encuentra la planicie aluvial del lago, constituida por materiales piroclasticos retrabajados (pómez, escorias, arenas y limos), que forman terrazas, además de grandes bloques lávicos angulares, que se desprenden del frente de lava basáltica La Cascada y también de grandes bloques de pómez del depósito San Agustín. Todos estos clastos son transportados durante las crecidas y descargas del río Guluchapa en el lago [8].



fallas con principalmente el movimiento de desgarre. Tomado de [28]. B) La caldera de Ilopango se encuentra ubicada Central con rumbo WNW-SES, limitando al sur con el sistema de fallas y la Cordillera del Bálsamo. Los volcanes Figura 3.1: Esquema estructural de la zona de estudio. A) Entorno tectónica de América Central. Las flechas indican es régimen transtensivo es generado por el movimiento relativo hacia el oriente de la Placa del Caribe con relación a la de Norteamérica, y el antearco fijado a esta última. C) La zona de estudio se sitúa dentro de la estructura del Graben próximos al área metropolitana de San Salvador (AMSS); GU = volcán Guazapa, NE = volcán Nejapa, SS = volcán entre los departamentos de San Salvador, Cuscatlán y La Paz. El frente volcánico de El Salvador (triángulos sólidos) San Salavador, LI = caldera de Ilopango, CJ = caldera Jayaque, P = plan de la Laguna.

3.2. Características geológicas generales

Las zonas adyacentes a la caldera de Ilopango están rodeadas por tres formaciones volcánicas denominadas: Formación Bálsamo del Mioceno Tardío-Plioceno, la Formación Cuscatlán (Plioceno-Pleistoceno temprano y la Formación San Salvador del Pleistoceno tardío-Holoceno [29] [27].

La Formación Bálsamo, la unidad principal en la estructura de la Cordillera del Bálsamo ubicada al sur del Graben Central y la litoestratigrafía más antigua, representa los restos de grandes estratovolcanes, tobas y brechas volcánicas epiclásticos, flujos de lavas basalticas-andesiticas [30]. La Formación Cuscatlán es un conjunto de productos explosivos asociados a la evolución de calderas de las Jayaque e Ilopango, más joven o contemporáneo a la Formación Bálsamo, comprende domos silícicos, tobas, ignimbritas, interestratificadas localmente con basaltos y/o lavas andesíticas [29] [30] [31] . La Formación San Salvador se encuentran mayoritariamente en el sector norte del sitio de estudio, comprende una compleja unidades de coladas de lavas, aluviones y tefra de las calderas Coatepeque, el volcán de San Salvador e Ilopango asociados con la evolución del Graben Central [32]. Ver figura 3.3.

3.2.1. Correlación estratigráfica de los depósitos eruptivos de la caldera de Ilopango

En los últimos 57,000 años la caldera de Ilopango ha sido un centro de alta actividad eruptiva con cuatro erupciones de tipo freatoplinianas-pliniana, los depósitos de tefras son denominadas Tierra Blanca (TB) y se clasifican de la más antigüa a la más joven como TB4, TB3, TB2 y TBJ, como se muestra en la Tabla 3.1 y figura 3.2 .

ID	Tipo de erupción	Espesor (m)	Volumen	Edad es-
			(Km^3)	timada
TB4	Pliniana	7 - 3	20	36 mil años
TB3	Freatomagmática	1.5 - 1	1 - 5	19 mil años
TB2	Freatomagmática	2 - 1	1 - 5	9 mil años
TBJ	Ultrapliniana	1 - 0.5	70	536 d.C.

Tabla 3.1: Ciclo eruptivo de la caldera de Ilopango. Tomado de [30] [32] [4] [3] [33].

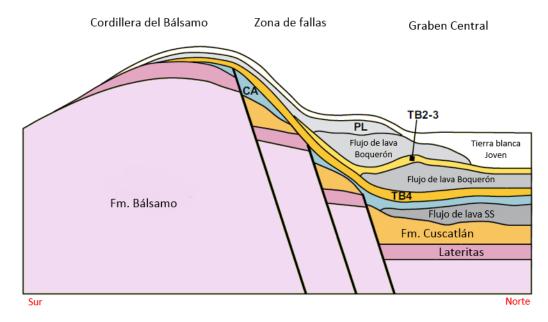


Figura 3.2: Esquema donde se muestra las relaciones espaciales entre las unidades de roca y tefra en la parte norte-sur del área de estudio. PL (tefras de Plan de Laguna), CA (tefras Congo y Arce), TB (Tierra Blanca). Tomado y modificado de [30].

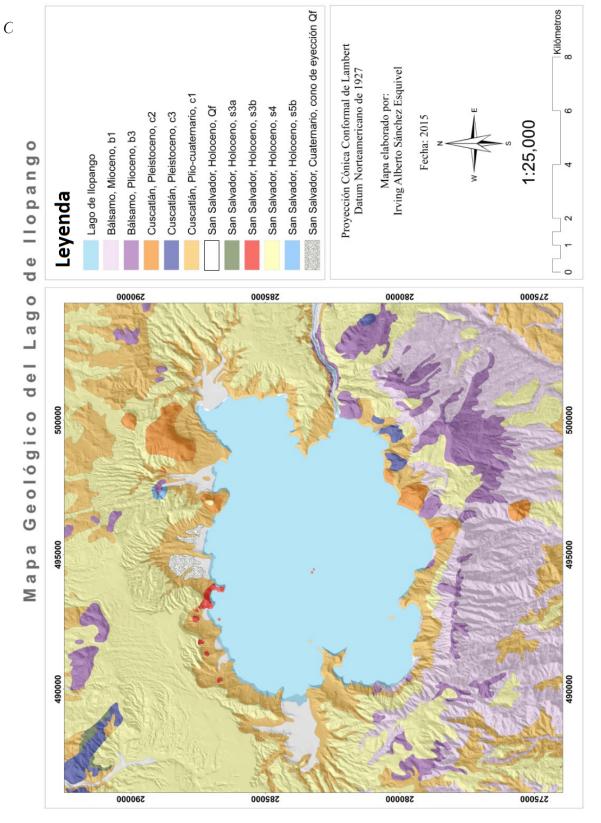


Figura 3.3: Mapa geológico en los contornos de la zona de estudio. Tomado y modificado de [34]

3.3. Actividad microsísmica en la caldera de Ilopango

Las actividad sísmica en la caldera de Ilopango es un fenómeno natural producido por una rápida liberación de energía. La energía liberada se propaga en todas las direcciones desde su origen (foco o hipocentro) en forma de ondas y son registradas por la Red de Telemetría Sísmica del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales desde 1984 hasta la actualidad. Las características de las señales sísmicas y su comportamiento temporal, sugieren que el origen de la sismicidad esta asociado al movimiento de las fallas geológicas, fracturamiento de rocas por debido a procesos de presurización de la cámara magamática, etc. (Ver figura 3.5).

Los microsísmos registrados son generalmente de magnitudes entre 0.5 - 3.7 Mc y profundidades focales entre 1 - 9 km [35]. En el periodo de 2004 a 2011 se registraron 1083 microsismos (ver figura 3.4). En el año 2015 se registraron dentro de la caldera de Ilopango 32 microsismos con magnitudes entre 0.3 - 3 y profundidades entre 0.3 - 12 km (ver figura 3.5) [37]. La ubicación de la actividad microsísmica en la caldera de Ilopango sugiere que existe un posible debilitamiento estructural a lo lago de los sistemas de fallas geológicas locales con rumbo NW-SE.

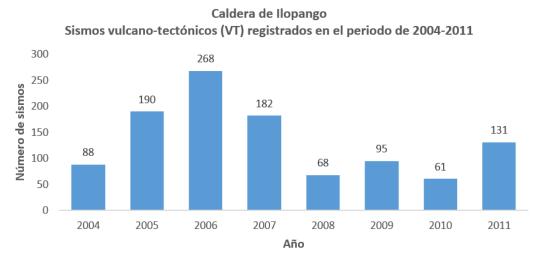


Figura 3.4: Registro de miscrosismicidad en la caldera de Ilopango 2004-2011. Tomado y modificado de [36].

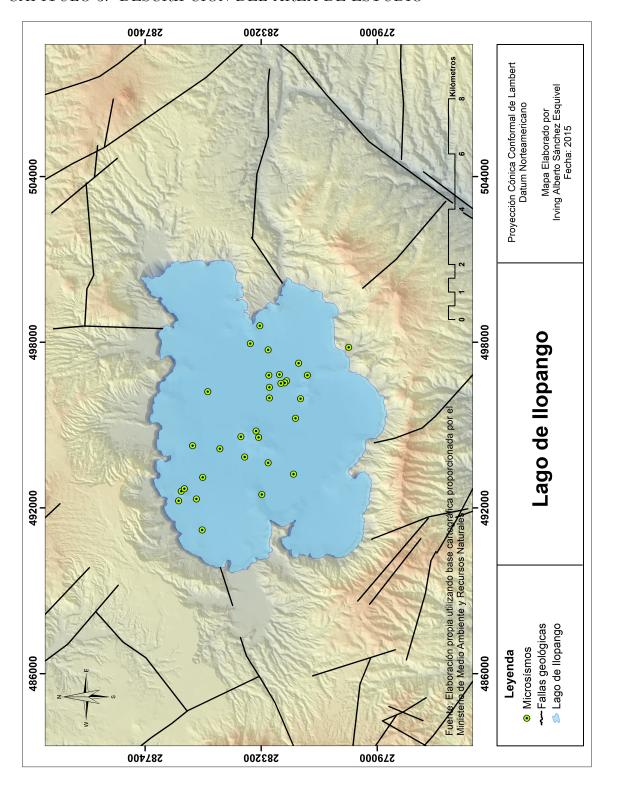


Figura 3.5: Ubicación de los microsismos registrados en la caldera de Ilopango en el año 2015 (puntos en verde) y los sistemas de fallas geológicas locales (lineas en negro). Tomado y modificado de [37].

Capítulo 4

Metodología

4.1. Diseño experimental

El montaje experimental para la recolección de datos batimétricos y físico-químicos se describe de forma general en la figura 4.1. Las tabla 4.1 y 4.2 muestran los equipos disponibles para la toma de datos y los software que se emplearán para el procesamiento de los datos. Para generar la base de los datos batimétricos, se diseño una malla de 500 m de espaciamiento y 24 puntos de muestreo para el registro de parámetros físico-químicos como se muestra en la figura 4.2.

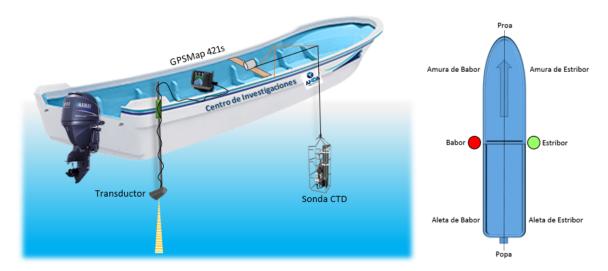


Figura 4.1: Montaje del sonar monohaz en la aleta de estribor midiendo las profunidades en dirección perpendicular al rumbo de la embarcación. La sonda multiparámetros CTD ubicada a estribor, registra la variación de los parámetros físico-químicos en la columna de agua.

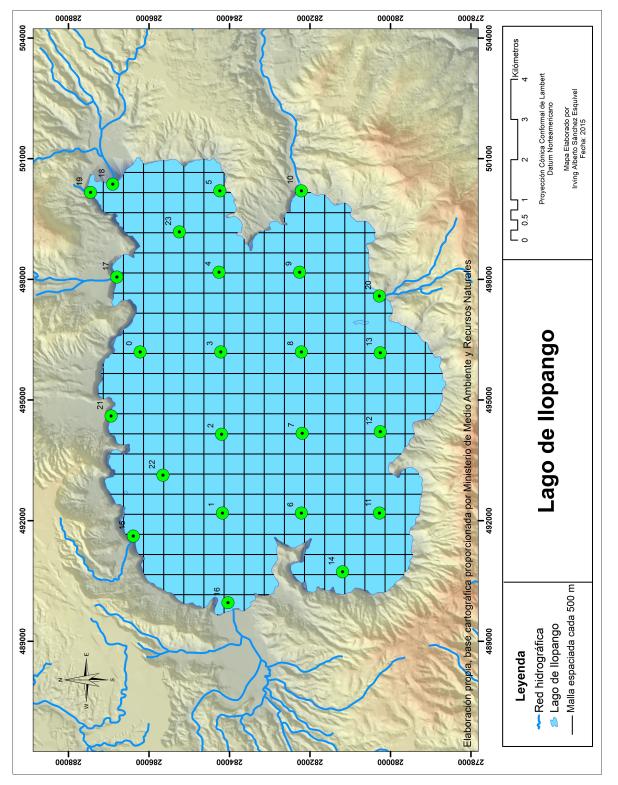


Figura 4.2: Mapa de ubicación y malla de recorridos propuestos para el levantamiento batimétrico con un espaciamiento de 500 metros entre cada linea y los sitios de muestreo de parámetros físico-químicos.

Equipo	Marca		Modelo
CTD	Sea-Bird	Electro-	SBE 25 Sealogger
	nics		
Ecosonda monohaz	Garmin		GPSMap 421s
Transductor	Garmin		Intelliducer
Lancha			

Tabla 4.1: Equipo a utilizar en el levantamiento batimétrico

Tabla 4.2: Software para la captura, procesamiento y gráfico de datos

Software	Plataforma	Versión
Global Mapper	Windows	15.0
Garmin BaseCamp	Windows	4.4.6
SeaTem	Windows	1.59
SBE Data Proces-	Windows	7.23.2
\sin g		
ArcGis	Windows	10.1
Golden Surfer	Windows	12.6.963
Matlab	Windows	8.3.0.532

Medición de la profundidad: El sonar de haz simple (ver figura 4.3 y 4.4) emite pulsos cortos ultrasónicos que se reflejan en el fondo lacustre. El eco de retorno se amplifica y se registra de modo continuo. El intervalo de tiempo entre la emisión y recepción del pulso reflejado es proporcional a la profundidad del fondo lacustre.

La emisión y recepción acústica se realiza a través de un proyector y un hidrófono respectivamente, cuando las dos piezas de harware se encuentran ensambladas en un mismo dispositivo se denomina **transductor**. En la emisión, la energía eléctrica se convierte en acústica, y en la recepción, la compresión generada en el cristal piezoeléctrico por las ondas mecánicas producto de la reflexión del pulso acústico en el fondo lacustre es convertida en pulso eléctrico.

El transductor fijado en la aleta de estribor a una profundidad de 50 cm bajo la superficie del agua, emite pulsos de sonidos en frecuencias de 200kHz y 50kHz, alcanzando una profundidad máxima 457 m. La velocidad máxima de la embarcación recomendada por el fabricante es de 4 nudos (7.4 km/h). La ecosonda registra de forma continua el posicionamiento, profundidad y temperatura superficial del agua, almacenando los datos en la memoria interna

del equipo y posteriormente son descargados a la computadora por medio de una memoria SD para su posterior procesamiento.

La malla de recorridos para la toma de datos posee un espaciamiento de 500 metros entre cada linea debido a las dimensiones del sitio de estudio, como se muestra en la figura 4.2, el rumbo de la embarcación es visualizado en tiempo real en una laptop por medio del programa Global Mapper.

Medición de los parámetros físico-químicos: La medición de los parámetros físico-químicos están distribuidos espacialmente en 24 puntos en el lago (ver figura 4.2). La sonda multiparámetros ubicada a estribor de la embarcación es sumergida en el agua con un dispositivo torno-manivela y una cuerda de 250 metros de longitud como se muestra en la figura 4.1. La frecuencia de muestreo es de 8 lecturas por segundo, las cuales se promedian y almacenan de forma automatizada en la memoria interna del instrumento y luego son descargados hacia una computadora utilizando un puerto USB/RS 232 para el procesamiento y análisis de los datos utilizando el software del instrumento.

4.2. Sonar monohaz GPSMap 421s: Principio de operación

El sonar de haz simple (SBES por sus siglas en ingles) ó ecosonda monohaz [10], posee un dispositivo que emite la señal acústica llamado **proyector**, elaborado con dos placas metálicas separadas por una cerámica en el medio, como se muestra en la figura 4.3. La aplicación del potencial eléctrico a través de las placas produce una variación en el grosor del cristal (efecto piezoeléctrico). La alteración del potencial eléctrico causa la vibración del cristal y consecuentemente la vibración de toda la unidad. Recíprocamente, la compresión mecánica del cristal produce una diferencia de potencial entre las caras opuestas del cristal [10]. La ecosonda es capaz de medir los cambios de presión por medio de un **hidrófono**. Los proyectores y los hidrófonos son a menudo la misma pieza de hardware denominada **transductor**. ver figura 4.3.

Los componentes del sonar utilizados en esta investigación son:

■ Transductor de montaje en popa: es el dispositivo hidrográfico que convierte la energía eléctrica en mecánica en forma de una onda acústica que se propaga a través del agua y mide los cambios de presión asociados al eco reflejado del fondo lacustre. La

frecuencia de la señal emitida es de 200 y 50 kHz. Ver figura 4.3.

- **GPSMap 421s:** es un plotter compacto que incorpora un mapa base mundial mejorado por satélite que permite observar en tiempo real la velocidad de la embarcación, dispone de la certificación NMEA 2000 para conectar el transductor y controlar la frecuencia de los pulsos de sonido y la frecuencia de muestreo. Ver figura 4.4. El procesador registra la temperatura a nivel del transductor, el tiempo de la emisión y recepción del pulso de sonido para calcular la profundidad y le asigna una coordenada geográfica.
- Fuente de energía y cable de comunicación: una batería de 12 voltios suministra la energía hacia el GPSMap 421s y el transductor por medio del cable de comunicación I/O.

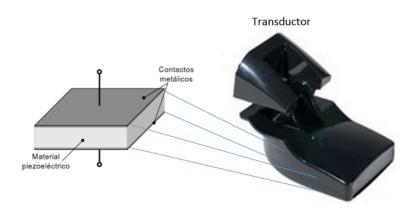


Figura 4.3: Transductor utilizado para el levantamiento batimétrico, proyecta la energía acústica en un haz orientado verticalmente.

4.2.1. Funcionamiento del Sonar

La ecosonda convierte la energía eléctrica en energía acústica. El voltaje de control es suministrado a partir de una fuente externa que activa un oscilador que produce una señal sinusoidal o cuadrada, pasando por un amplificador y posteriormente enviada a la fuente de emisión (proyector) que genera las ondas de sonido que inciden sobre el fondo del lago [38]. La interacción con la superficie del fondo resulta en una reflexión, transmisión y dispersión [10]. La energía reflejada que regresa al transductor, el eco, es percibido por el receptor (hidrófono) y la señal entra al amplificador que envía la señal a un circuito comparador y genera una señal sinusoidal o cuadrada hacia un dispositivo flip flop SR [38] de almacenamiento temporal de dos estados, cuyas entradas principales permiten dos actividades:

- R: el borrado (reset en inglés), se activa cuando se transmite la señal original, entrando al bloque de Reset, y su salida es cero.
- S: el grabado (set en inglés), se activa al registrar el eco, estos pulsos de entrada se registran bloque Set y general una lectura de salida.

La señal de salida es visualizada en tiempo real en el monitor del GPSMap 421s y grabada en la memoria interna del dispositivo. La profundidad es calculada por medio de la siguiente ecuación:

 $Z_m = \frac{1}{2} * t * \overline{c} \tag{4.1}$

donde Z_m es la profundidad, t es el tiempo entre la transmisión y recepción del eco y \overline{c} es la media de la velocidad del sonido en la columna de agua [10].

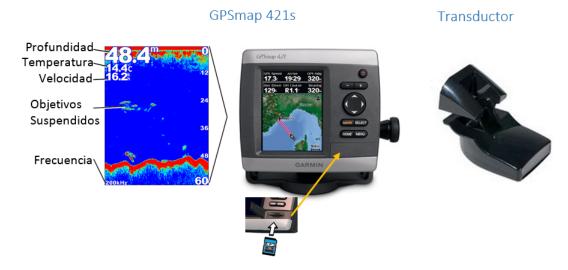


Figura 4.4: Ecosonda de haz simple y transductor de frecuencia dual. Tomado y modificado de [39].

4.3. Procesamiento de los datos Batimétricos

El procesamiento de los datos batimétricos se dividió en varias etapas consecutivas, mostradas en el diagrama de flujo en la figura 4.5.

Lectura de datos

Los registros de profundidad se extraen del equipo GARMIN GPSMap 421s en formado *.ADM utilizando una memoria SD. El programa BaseCamp convierte el archivo *.ADM en diferentes formatos *.kml, *.gpx y *.txt. El formato KML contiene datos geográficos para ser

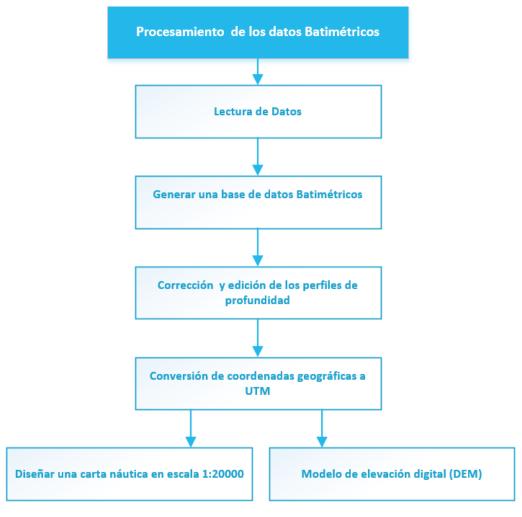


Figura 4.5: Diagrama de procesamiento de datos de batimetría con ecosonda monohaz.

manejados con el programa Google Earth. El archivo *.gpx, permite establecer un control de los recorridos de la embarcación en tiempo real en el software Global Mapper. El formato de texto permite el procesamiento de los datos de profundidades en los software Matlab 8.3, Hypack 2013, ArcGis 10.1 y Golden Surfer 12.

Creación de una base de datos:

La rutina implementada en Matlab 8.3 denominada **graba gps.m**, tiene como entrada la información de las coordenadas espaciales, profundidad y temperatura almacenada en los archivos de texto y se obtiene como salida una base de datos denominada (**Datos_GPS.mat**) que contiene la información de los 37 perfiles de profundidad.

Corrección de datos de profundidad:

Los sondajes de la profundidad son corregidos por las variaciones de velocidad del sonido en la columna de agua utilizando el software **Hypack**. Este permite generar archivos de correcciones de velocidad del sonido generados en con la herramienta Sound Velocity que contiene datos de profundad vs velocidad del sonido y guardados en un archivo con extensión *.VEL. Este archivo es cargado en el Editor Monohaz. El editor calcula las correcciones por curvatura de los rayos a los datos de sondajes a medida que es leído en el editor. Las correcciones por velocidad del sonido no son interpoladas; el mismo valor es asignado a todas las profundidades en el mismo rango.

Por otra parte, el movimiento por mareas es un fenómeno cíclico y datos adquiridos en distintas horas no conservan la misma referencia, por lo que el valor de profundidad medido debe de ser corregido. Las variaciones por mareas son registradas por un mareografo instalado en el sector oeste del lago. Esta información es incorporada a los sondajes de profundidad a fin de corregir los valores de profundidad que son asociados al movimiento de las mareas dentro del lago. Finalizada la integración de las variaciones de la velocidad y las mareas a los datos de profundidad; estos son guardados en formato *.txt para ser leídos con una rutina en Matlab denominada Sel tracks.m que descarta de forma automática los registros que no contengan datos de profundidad y registros repetidos asociados a las intersecciones de las lineas horizontales y verticales.

Conversión de coordenadas:

La conversión de las coordenadas geográficas a UTM, utiliza una rutina en Matlab llamada **Revisa.m:**, ademas permite visualizar cada uno de los recorridos de forma gráfica, permitiendo aplicar correcciones en algunos puntos de medición de forma manual a partir de la interpretación gráfica del fondo lacustre. Los objetos en suspensión en la columna de agua (peces o partículas en suspensión) y el movimiento de rolido y cabeceo de la embarcación, generan anomalías en la lectura de la profundidad. Estas anomalías se observan con facilidad en los perfiles dado que los registros reflejan las variaciones abruptas que no son asociadas a cambios morfológicos.

Diseño de una carta náutica

Las profundidades del lago de Ilopango son representadas con curvas batimétricas interpoladas cada 10 metros. Ademas de cumplir las siguientes características [10] [11]:

Plana : Significa que sea posible colocar sobre la cubierta de una mesa y trabajar en ella con instrumentos de dibujo, como asimismo, para facilitar su estiba, acopio y conservación a bordo.

Semejante: El dibujo debe mantener la misma forma de lo que representa y las mismas posiciones relativas entre todos los detalles y objetos que contiene.

A Escala: Significa que se podrá medir, en ella, las distancias a que se encuentran la costa y demás puntos notables, en particular entre puntos situados en el mismo plano o entre un rumbo y otro objeto terrestre representado en ella.

Exactitud: Es la absoluta igualdad entre las dimensiones lineales, angulares, etc. que se miden o calculan en la carta con las dimensiones reales correspondientes existentes en el terreno.

Orientada: Significa que la porción de tierra y agua dibujada deben tener la misma posición relativa respecto de los meridianos trazados que indican el norte verdadero y posición relativa que realmente tienen en la superficie terrestre. La orientación en una carta permite trazar rumbos, demarcaciones y rectas de posición.

Completa y clara: Las cartas deben contener todos los datos que requiere la navegación y presentarlos con la claridad necesaria que permita emplearse con rapidez, seguridad y confianza.

Actualizada: Una carta se encuentra actualizada (al día) si está permanentemente corregida.

Modelo de elevación digital

El modelo de elevación digital(DEM por sus siglas en ingles), representa de forma visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite

caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el fondo del lago. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo raster con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados (ArcGis 10.3, Surfer 12.0). El DEM posee la resolución horizontal de dos metros.

4.4. Perfilador multiparámetro CTD SBE 25 Sealogger

El perfilador oceanográfico CTD, fabricado por la compañía Sea-Bird Electronics, registra los parámetros de conductividad eléctrica, temperatura, presión y pH de la columna de agua del área de estudio. Ver figura 4.6. En el procesamiento de los datos es posible derivar parámetros como: profundidad, densidad y velocidad del sonido, por la relación directa entre las variables anteriormente mencionadas. A continuación se describen las características de los sensores principales del CTD:

■ Sensor de conductividad del agua SBE 4C: Es un sensor modular independiente que miden la conductividad eléctrica cubriendo así toda la gama de aplicaciones oceánicas y cuerpos de agua dulce. El sensor tiene una frecuencia de salida de 2.5 a 7.5 kHz. Está diseñado para registrar datos hasta una profundidad máxima de 6,800 metros [40].

Certificados de calibración de conductividad muestran una ecuación que contiene el término de corrección dependiente de la presión para tener en cuenta el efecto de la carga hidrostática (presión) en la celda de conductividad:

$$Conductividad(S/m) = slope * \frac{(g + hf^2 + if^3 + jf^4)}{10(1 + CTcor + CPcor)P} + offset$$
 (4.2)

donde g, h, f, i, CTcor, CPcor son coeficientes de calibración proporcionados por el fabricante, f es la frecuencia del instrumento (kHz), t es la temperatura del agua (grados Celsius) y P es la presión del agua (dbar). El software SBE Data Processing implementa automaticamente la ecuación anterior [40].

■ Sensor de temperatura SBE 3F: Es un sensor modular independiente sensible a los cambios de temperatura, está protegido de la presión por un tubo de acero inoxidable, diseñado para registrar datos hasta un profundidad de 6,800 metros. La frecuencia de salida del sensor oscila desde 5 hasta 13 kHz correspondiente a la temperatura de -5 a 35 °C. La frecuencia de salida es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la

resistencia del termistor, que controla la salida de un circuito patentado Wein Bridge. La resistencia del termistor es exponencialmente relacionado con la temperatura. La SBE 3 termómetro tiene una precisión típica / estabilidad de \pm 0.002 °C por años y la resolución de \pm 0.0003 °C a 24 muestras por segundo [40] . La ecuación implementada por el software SBE Data Processing, para obtener los valores de temperatura, esta dada por

$$ITS - 90 = \frac{1}{g + hln(f_0/f) + i[ln^2(f_0/f) + jln^3(f_0/f)]} - 273.15(^{\circ}C)$$
 (4.3)

donde g, h, i y f_0 son coeficientes de calibración proporcionados por el fabricante, f es la frecuencia del instrumento (kHz), t es la temperatura del agua (grados Celsius) [40]

• Sensor de presión SBE 29: Es un sensor modular autónomo que mide la presión absoluta hasta los 7000 metros de profundidad. La interfaz electrónica proporcionan un voltaje de salida dependiente de la presión (+5 a -5 V) y un voltaje de compensación de temperatura de 0 a +5 VDC (30K ohmios termistor a 25 °C) [40]. Presión para la temperatura correcta en unidades de ingeniería [Pnum] se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$P_{num} = V_p * 819 - (TC * \frac{T}{1024}) \tag{4.4}$$

Donde Vp es señal de voltaje de presión

TC es un valor de compensación

$$T = -VT * 21.02373 + 40.293(C)$$
; $VT = TC$

Posteriormente los valores de presión son convertidos a valores de profundidad por medio de la siguiente ecuación:

$$Profundidad(m) = Presion(dbar) * 1.019716$$
 (4.5)

■ Sensor de pH SBE 18: Es un sensor modular de pH posee electrodos de Ag / AgCl de referencia para proporcionar mediciones in situ hasta una profundidades de hasta 1.200 metros. El tiempo de respuesta del sensor es de 1 segundo con un rango de medición de 0 - 14 ±0.1 [40] . El software de procesamiento calcula los datos de pH utilizando de forma automática la siguiente ecuación:

$$Vout = offset + [slope * (R * T/F) * Ln(10) * (pH - 7)]$$
(4.6)

donde R es la constate de los gases (8.31434 J mol $^{-1}$ K $^{-1}$), F es la constante de Faraday (964867x10-4 C mol $^{-1}$), T es la temperatura del agua en grados Kelvin y V_{out} es el voltaje de salida del sensor de pH.

Tabla 4.3: Especificaciones técnicas del instrumento CTD SBE 25 Sealogger. Tomado de [40]

Sensor	Rango	Precisión
Conductividad	0 - 7 S/m	$\pm 0.0003 \; S/m$
Temperatura	-5 a +35 °C	± 0.002 °C
Presión	0 a 2000 m	± 0.1 m
рН	0 a 14	± 0.1

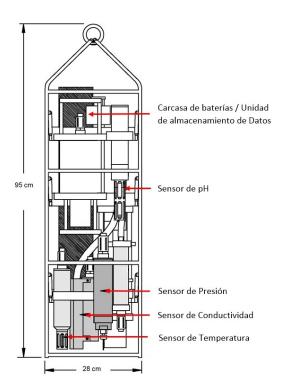


Figura 4.6: Perfilador multiparametros CTD. Tomado y modificado de [40].

4.4.1. Procesamiento de los datos CTD

Los datos obtenidos directamente del instrumento se encuentran en formato hexadecimal (*.hex), por lo que se uso el programa SBE Data Processing, para convertir los datos al formato ASCII. El procesamiento se realizó de manera automatizada, para lo cual se preparó un archivo de procesamiento por lotes (batch) que contiene los módulos necesarios a aplicar. A continuación se presenta una lista de los módulos que se emplean para el procesamiento de los parámetros físico-químicos:

DatCnv.psa: Usado para convertir los datos hexadecimales (*.hex) al formato ASCII (*.cnv). **Filter.psa:** Se utilizó para aplicar un filtro de paso bajo en los datos de presión con una constante de tiempo de 0,5 segundos.

AlignCTD.psa: Se alinean los sensores de conductividad y pH respecto al tiempo, asegurando que todos los cálculos se realizan utilizando mediciones de la misma parcela de agua. El valor de corrección de 0.073 segundos, para el sensor de temperatura debido a su rápida respuesta de 0.006 segundos no se le aplica dicha corrección.

LoopEdit.psa: Corrige los movimientos verticales del equipo asociados a movimientos por oleaje o de la embarcación. El valor de la velocidad de descenso del CTD empleado en este módulo fue de 0.25 m/s.

Derive.psa: Utilizado para calcular magnitudes derivadas como velocidad del sonido y densidad.

BinAvg.psa: Promedia los valores en intervalos constantes (bins) de 0.25 m.

Capítulo 5

Discusión y análisis de resultados

En este capítulo se ilustran y describen los resultados haciendo uso de mapas, modelos 3D, perfiles topográficos y físico-químicos obtenidos a partir de los datos registrados en campo.

5.1. Carta batimétrica del lago de Ilopango

Durante el 12 de Marzo al 13 Mayo del 2015, se sondearon 279,148 puntos del lago en 375.03 km de registros, logrando completar 36 perfiles de los 39 perfiles propuestos para elaborar la carta batimétrica de la zona de estudio. Las curvas de nivel (ver Apéndice A) se presentan en intervalos de diez metros y tienen una orientación N-S. La máxima profundidad registrada es de 235.9 ± 4.7 m a 1.6 km al este de la Punta La Península.

El plano al cual están referidas las sondas o profundidades denominado Nivel de Reducción de Sonda (N.R.S) definido en 438.53 m sobre n.m.m. El criterio para definir el NRS se basa en el registro de las mareas durante un largo periodo de tiempo y se define un plano tan bajo que la marea rara vez descienda bajo él.

Por otra parte, las pendientes registradas frente a la zona costera de Amatitán, al Oeste del perfil AA', posee pendientes de 28.11 % hasta alcanzar la planicie de 220 m de profundidad que se extiende en un área de 15.22 km², posteriormente la pendiente va aumentando de forma gradual hasta llegar a 19.36 % en el sector Este de la caldera (ver figura 5.1). El perfil BB' definido de Oeste a Este, entre la desembocadura del del río Chagüite y la Punta El Chaperno, destaca en la parte central el domo intracaldérico denominado Isla Los Cerros Quemados (ICQ), emplazada a 210 m de profundidad, posee un área de 3.02 km² y la parte azimutal sobresale hasta 10 mts del nivel del lago. El perfil CC' a 14 metros bajo la superficie y 744 m al noroeste de la Isla Cerro Los Patos (ICP), se registró el emplazamiento de un domo con tres cretas distanciadas ~300 m con alturas varían entre los 185 a 200 mts.

En el perfil **DD'** definido entre frente al turicentro de Apulo y el Cerro El Mono, destaca el alineamiento estructural de las Islas Chachagaste, Islas Cerros Quemadas y la Isla Cerro Los Patos. La isla Chachagaste que sobresale 10 m de la superficie del lago y una segunda estructura ubicada a 10 m bajo la superficie del lago a 1 km al noroeste del turicentro de Apulo . La isla posee una altura de 140 m y las pendientes de sus laderas varían entre 60 y 65 %, presentan una alineamiento con las Islas Cerros Quemados emplazada en la parte central de la caldera y el domo de tres crestas ubicado al Noroeste de la Isla Cerro Los Patos. El perfil **EE'** se registraron pendientes de 50 % frente a la Punta Tenango (**PT**). El perfil **FF'** se observa la planicie ubicada a 210 m de profundidad que se extiende en un área de 19.68 km² que rodea a la ICQ.

La costa norte del lago entre el Turicentro de Apulo y el Arenenal de Cujuapa, se caracteriza por tener un borde de costa con multiples estructuras anulares posiblemente asociadas a deslizamientos. En las regiones cercanas a las desembocaduras de ríos Guilapa, río Guluchapa y Arenenal de Cujuapa, presentan pendientes suaves entre $10\,\%$ y $15\,\%$ las profundidades de $100\,$ m se registran a $700\,$ m de la linea de costa, en tanto que las zonas no influenciadas por los ríos, las profundidades de $100\,$ m se registran a $200\,$ m de la costa con pendientes entre $25\,\%$ a $34\,\%$.

El límite occidental entre la punta El Eco y Punta Champalomo en la desembocadura del río Chagüite las pendientes son generalmente menor a $10\,\%$ hasta llegar a la planicie de $220\,$ m. Las isla denominadas El Cerrón (**IC**) tiene una longitud de $500\,$ m y una altura entre $100\,$ a $220\,$ m. Por otra parte el borde sur del lago se caracteriza por un escarpe de $500\,$ m sobre la superficie del lago. Las pendientes bajo la superficie del lago son generalmente pronunciadas entre $20\,\%$ a $35\,\%$.

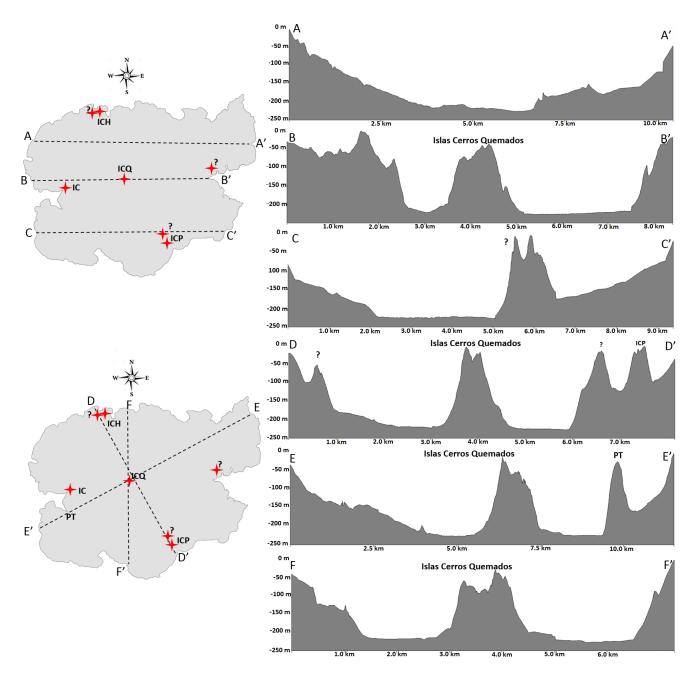


Figura 5.1: Perfiles batimétricos y el alineamiento preferencial en dirección Oeste-Este y Noroeste-Sureste: ICH = Isla Chachagaste, IC = Isla El Cerrón, ICQ = Isla Cerros Quemados, ICP = Isla Cerro Los Patos, ? = domos sin nombre.

5.2. Modelo 3D de la caldera de Ilopango

Las erupciones de la caldera de Ilopango han sido acompañadas por un volcanismo monogenético intra y pericaldérico. En los alrededores de la caldera y en su interior se han registrado cerca de 35 estructuras volcánicas de ese tipo [2]. En esta investigación se diseño un modelo 3D de la caldera de Ilopando y sus estructuras intracaldéricas a partir de los datos batimétricos con resolución de dos metros. Los ocho domos intracaldéricos denominadas: 1. Isla Chachagaste, 2. Sin nombre, 3. Isla Portillo, 4. Isla Cerrón, 5. Isla Los Cerros Quemados, 6. Sin nombre, 7. Isla Cerro Los Patos, 8. Sin nombre, ubicadas en dirección NW-SE y E-W posiblemente relacionadas con los sistemas de fallas geológicas locales que presentan la misma dirección, ver figura 5.2 y 5.3

Por otra parte, los parámetros morfométricos primarios de la caldera están: longitud máxima o distancia máxima en agua, medida entre los dos puntos más alejados según una línea NE-SW, que pasa por la quebrada Santa Rosa y Punta El Piñal, es de 12.71 km para una anchura máxima, según una perpendicular de este eje, de 8.96 km. El borde costero posee una longitud de 55.84 km; el área total del lago, incluyendo todas las islas y limitados por el perímetro del cuerpo de agua es de 70.23 km². El área superficial que no incluye las islas dentro de los limites de la linea costera es de 70.17 km². La profundidad máxima registrada es de 235.9±4.7 m. El volumen estimado del lago es de 9.97 km³ y el domo dacítico que se formó en la última erupción de 1880 dominado Isla Cerros Quemados posee un volumen estimado de 0.15 km³ y se extiende en una área de 3.02 km². La estimación del volumen fue obtenido en el programa AutoCAD Civil 3D, que combina para calcular el volumen superficie superior del Modelo Digital de Elevaciones (MDE), generado por la interpolación de curvas de nivel a cada 10 metros, obtenidas de los cuadrantes topográficos digitales, a escala 1:20,000 y la superficie inferior de referencia que encierra los bordes del MDE.

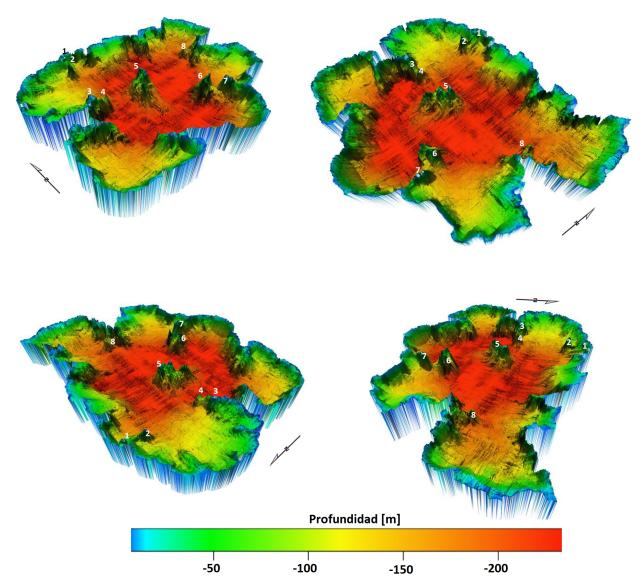


Figura 5.2: Modelo 3D con resolución de dos metros de la topografía de la caldera de Ilopango. Las estructuras intracaldericas registradas en el levantamiento batimétrico son denominadas: 1. Isla Chachagaste, 2. Sin nombre, 3. Isla Portillo, 4. Isla Cerrón, 5. Isla Los Cerros Quemados, 6. Sin nombre, 7. Isla Cerro Los Patos, 8. Sin nombre.

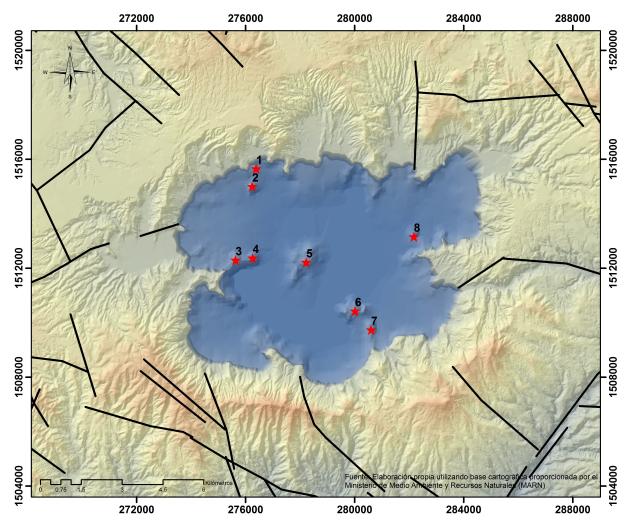


Figura 5.3: Ubicación de las fallas geológicas locales y las estructuras intracaldericas de la caldera de Ilopango. 1. Isla Chachagaste, 2. Sin nombre, 3. Isla Portillo, 4. Isla Cerrón, 5. Isla Los Cerros Quemados, 6. Sin nombre, 7. Isla Cerro Los Patos, 8. Sin nombre.

5.3. Parámetros físico-químicos del lago de Ilopango

Las variaciones espaciales y temporales en los valores de temperatura, conductividad eléctrica, pH y velocidad del sonido fueron registrados en 40 perfiles distribuidos como se muestra en la figura 5.4. Las variaciones en los parámetros físico-químicos se registran desde la superficie hasta los 45 m de profundidad, posteriormente los valores registrados fueron constantes o variaron proporcionalmente con la profundidad. Ver figura 5.5 c.

La temperatura superficial promedio registrada en los meses de marzo y mayo de 2015 es de 26.99 °C y 30.10 °C respectivamente. En enero de 2016 se registro una temperatura de 27.84 °C. La termoclina fue localizada entre profundidades de 15 a 40 m con variaciones entre 27.69 °C a 26.47 °C. La temperaturas promedio del hipolimnion medida es de 26.44 °C y se localiza a partir de los 45 m de profundidad. Ver figura 5.5 a.

Los valores promedios más altos en conductividad eléctrica se registraron a nivel superficial del lago. En 15 perfiles registrados en marzo de 2015 a 2 m de profundidad, el valor de conductividad es de 1,9185 μ S.cm⁻¹, 2,0479 μ S.cm⁻¹ en 12 perfiles correspondientes al mayo de 2015 y 1,9018 μ S.cm⁻¹ en 13 perfiles en enero de 2016. Ver figura 5.5 b.

Por otra parte, las mayores variaciones espaciales del pH, se localiza desde la superficie hasta 40 m de profundidad, probablemente asociadas a la actividad biológica que se desarrolla en el lago. Las mediciones puntuales a 1 m de profundidad, el pH registrado en marzo, abril, mayo, junio de 2015 fue de 8.4, 8.7, 9.1 y 8.8 respectivamente. En el mes de mayo se realizaron 12 perfiles de muestreo de pH hasta una profundidad de 160 m, permitiendo identificar que las mayores variaciones se registran en los primeros 40 m de profundidad, posterior a dicha profundidad el pH es constante, como se muestra en la figura 5.5 d. Los máximos valores de pH en el año 2015 coinciden con la proliferación cianobacterias del genero Anabaena sp, dandole una tonalidad verde musgo al lago de Ilopango. En enero de 2016 se realizaron 13 perfiles de pH hasta 160 m de profundidad, observándose un aumento en las concentraciones de los iones de hidrógeno de aproximadamente de diez veces en compracion a las registradas en mayo de 2015.

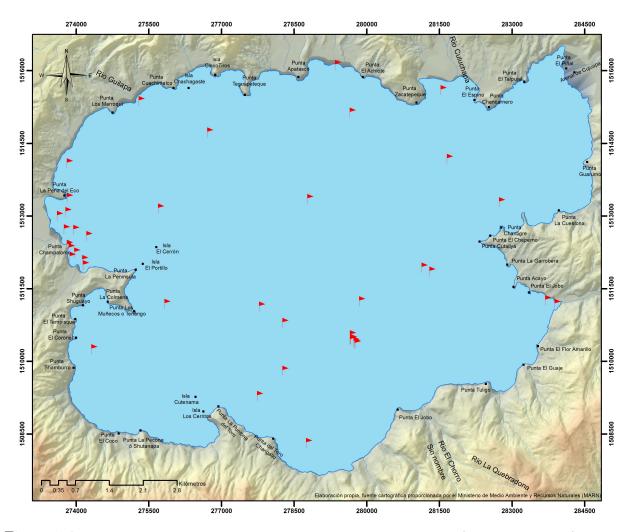


Figura 5.4: Distribución espacial de los cuarenta perfiles de muestreos (banderas en rojo) de temperatura, conductividad eléctrica, pH y velocidad del sonido.

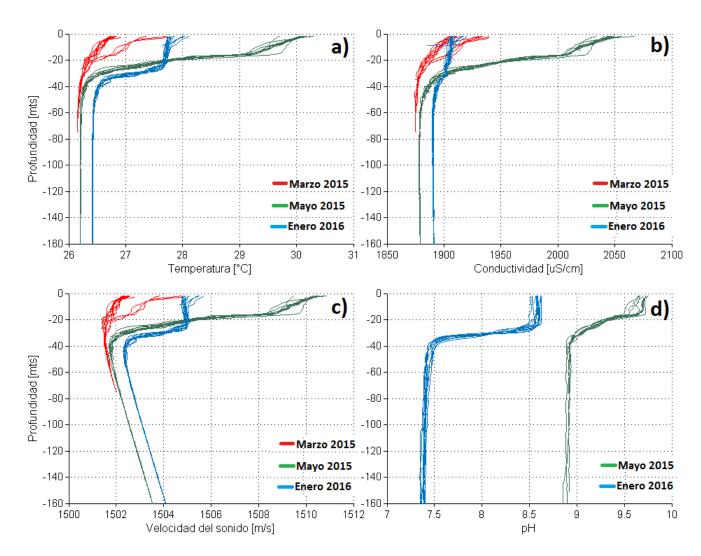


Figura 5.5: Variaciones espaciales y temporales de la tempetatura, conductividad eléctrica, velocidad del sonido y pH en el Lago de Ilopango.

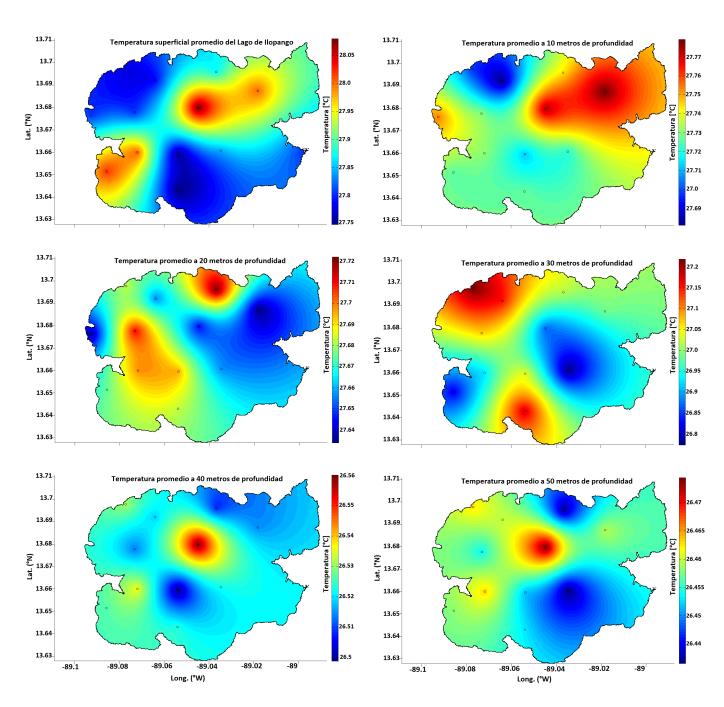


Figura 5.6: Variaciones espaciales de la temperatura del lago de Ilopango en enero de 2016.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

La instrumentación acústica permitió generar una carta batimétrica exploratorio a escala 1:20,000 y un modelo 3D de la caldera de Ilopango, registrándose una profundidad máxima de 235.9 ± 4.7 m y un volumen estimado de 9.97 km³.

Se identificaron siete estructuras intracaldéricas que presentan un alineamiento predominantemente en dirección noroeste-sureste y este-oeste. Es probable que el alineamiento este relacionado al debilitamiento estructural asociado con el sistema de fallas geológicas que presentan el mismo rumbo y la actividad microsísmica que se registra dentro de la caldera.

Al comparar la carta batimétrica generada en ésta investigación con respecto a la carta batimétrica de 1970-1980, no se observaron cambios morfológicos en las estructuras intracaldéricas y surgimientos de nuevas estructuras. Por otra parte se observan variaciones en los valores de profundidad en la desembocadura de los principales ríos tributarios: Chagüite, Arenal, Arenal de Cujuapa y el río Desagüe, probablemente asociado con la dinámica fluvial.

En este investigación no se registraron valores altos en las temperaturas asociados a actividades hidrotermales en las regiones cercanas a las estructuras intracaldéricas. Por lo tanto, las variaciones horizontales y verticales en los parámetros físico-químicos en la columna de agua, probablemente siguen patrones estacionales, donde la incidencia de la energía solar sobre el cuerpos de agua produce una diferencia de temperatura con respeto a aguas más profundas. El aumento en la temperatura, trae como consecuencia una estatificación térmica directa, teniendo un papel importante en la regulación de la mezcla vertical en el lago.

6.2. Recomendaciones

Es prematuro declarar que la actividad volcánica en el lago de Ilopango, haya terminado, abriendo la posibilidad que se formen nuevas estructuras intracaldéricas, por lo que es necesario realizar levantamientos batimétricos en el lago de Ilopango en el futuro, para verificar si existen cambios en las morfología de las estructuras subacuáticas o surgimiento de nuevas estructuras.

Incorporar sensores inerciales que registren los movimientos rotacionales asociados al rumbo, rolido y cabeceo de la embarcación para mejor el cálculo de la profundidad y el volumen del lago.


Realizar un levantamiento batimétrico con instrumentación que posean mayor cobertura cercana al 100%.

Auxiliarse de un sonar de barrido lateral para caracterizar la composición del fondo lacustre.

Crear un programa de monitoreo mensual de los parámetros físico-químicas incorporando los parámetros de oxigeno disuelto, nutrientes y turbidez, para caracterizar la variabilidad espacial y temporal en época seca y lluviosa.

Apéndice A

Levantamiento batimétrico, Lago de Ilopango.



Apéndice B

Mapa batimétrico, Corinto.

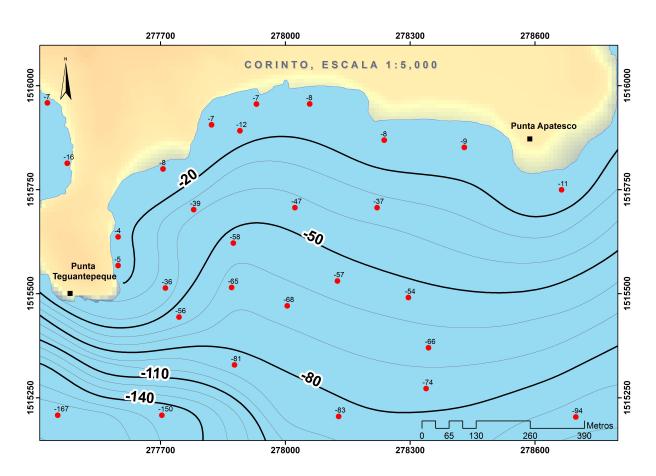


Figura B.1: Levantamiento batimétrico frente a las costa de Corinto.

Apéndice C

Mapa batimétrico, Playa Poza Verde.

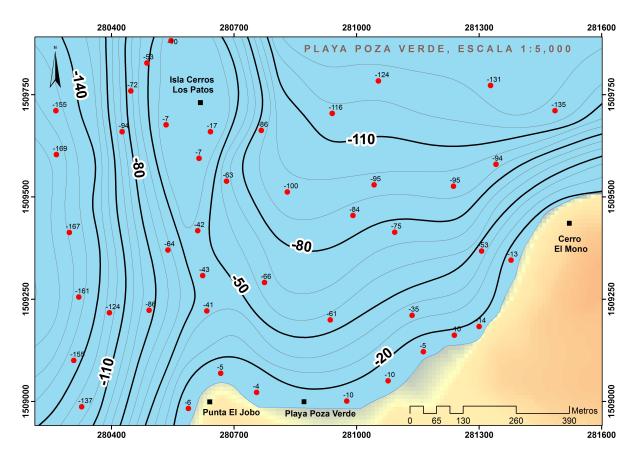


Figura C.1: Levantamiento batimétrico frente a Playa Poza Verde y Cerro El Mono, ubicados en el sector sur de Lago de Ilopango.

Apéndice D

Mapa batimétrico, Río Desagüe.

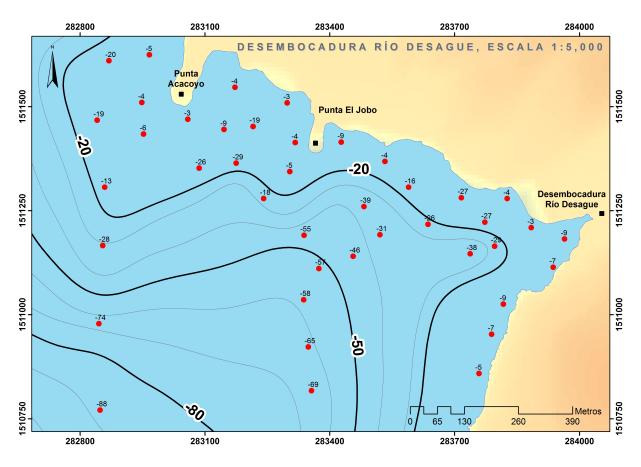


Figura D.1: Levantamiento batimétrico en la desembocadura del río Desagüe.

Bibliografía

- [1] Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, MARN., Inventario Nacional y Diagnóstico de los Humedales de El Salvador, San Salvador, 2004.
- [2] Hernández, W., Jicha B., Ferrés, D., Delgado-Granados, H., Nieto, J., Volcanismo monogenético en el noreste de la Caldera de Ilopango: Cono Peña Colorada, domo La Pilona y domo Buena Vista. El Salvador, p. 1-14, (2015).
- [3] Kutterolf, S., Freundt, A., Perez W., Schmincke H., The Pacific offshore record of Plinian arc volcanism in Central America, part 2: Distal tephras from volcanoes in Guatemala and El Salvador, as well as along-arc eruption chronology, (2007).
- [4] Goodyear, W.A., Earthquake and volcanic phenomena. December 1879 and Junuary 1880. Republic of El Salvador. Panama, (1880).
- [5] Instituto Geográfico Nacional, Carta náutica del Lago de Iloapngo, escala 1:20000, (1980).
- [6] Sapper, C., Los Volcanes de America Central, p. 23-24 (1925).
- [7] Dirección General de Estadísticas y Censos, DIGESTIC., Censo de población y vivienda, Población por área y sexo, (2007).
- [8] Hernández, W., Jicha, B., Ferrés, D., Delgado, H., Nieto, J., Volcanismo monogenético en el noroeste de la Caldera de Ilopango: Cono Peña Colodara, domo La Pilona y domo Buena vista. El Salvador, p. 1-49 (2013).
- [9] Lopez, D.L.; Bundschuh, J; Birkle, P.; Armienta, M.A.; Cumbal, C.; Sracek, O.; Cornejo, C.; Ormachea, M., Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America. In: Arsenic in Latin America Special Issue, J. Bunschuh editor, Science of the Total Environment, v. 429, p. 57-75 (2012).
- [10] Organización Hidrográfica Internacional, Manual de hidrográfia, Mónaco: Bureau Hidrográfico Internacional, vol. 3, p. 122-202 (2005).

BIBLIOGRAFÍA 55

[11] Servicio Hidrográfico y Oceanográfico, SHOA, Instrucciones hidrográficas Nº 5, Especificaciones técnicas para la ejecución de sondaje, cuarta edición, p. 2 – 25, (2003).

- [12] L-3 Communications SeaBeam Instruments, Multibeam Sonar Theory of Operation, p. 4-26, (2000).
- [13] Zemansky, S., Hugn D. Young, Roger A. Freedman, El sonido y el oído, de Física Universitaria con Física Moderna, Decimosegunda ed., vol. I, México, Pearson Educación. p. 527-540, (2009).
- [14] Urick, R., J., Principles of uderwater sound, 3rd edition, p. 7-416, (1978).
- [15] Zemansky, S., Hugn D. Young, Roger A. Freedman, Naturaleza y propagación de la Luz, de Física Universitaria con Física Moderna, Decimosegunda ed., vol. II, México, Pearson Educación. p. 1121-1143, (2009).
- [16] Resnick, R., Halliday, D., Krane, K., Física, Grupo Patria Cultural S.A de C.V, México, D. F Vol. 2, Cap. 43, p 347-350.(1999).
- [17] Cole, G. A., Textbook of Limnology, 3rd edition. The C. V., St. Louis, p. 401 (1983).
- [18] Roldan, G., Restrepo, J., Fundamentos de limnología neotropical, Segunda edición, 157-207, (2008).
- [19] Birge, E. A., Plankton studie on Lake Mendota: II, The crustacean of plankton from July, 1894, to December, 1896. Trans. Wis. Acad., p. 274-448, (1897).
- [20] Reeves, C. C., Developments in sedimentology, Introduction to paleolimnology, p. 44, (1968).
- [21] Lewis, W. M., A revised classification of lake based on mixing, p. 1782-1783 (1983).
- [22] Lopéz, L., Estudio limnológico del lago de Guija, determinación de su estado de eutrofización, p. 45-78 (2008).
- [23] García, L., Zamora, J., Estudio batimétrico en el Lago de Coatepeque, p. 12-14 (2010).
- [24] Williams, H. and Meyer Abbich H., Origen del Lago de Ilopango, p. 2-10 (1953)
- [25] Richer, M., Mann, C., Stix, J. Mafic magma injection triggering eruption at Ilopango caldera, El Salvador, Central America, p. 176-188 (2004).
- [26] Hernández, W., Aspectos geológicos e influencia en las aguas subterráneas y en los sismos en el Area Metropolitana de San Salvador. Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), (2008).

BIBLIOGRAFÍA 56

[27] Wiesemann, G., Remarks on the geologic structure of the Republic of El Salvador, Central America. Mitt. Geol. Palaont. Inst. Univ. Hamburg, vol. 44, p. 557 – 574, (1975).

- [28] Saxby, J., The subsurface structure of Ilopango caldera, El Salvador: insights from a new gravity survey, p. 2-49 (2015).
- [29] Reynolds, JH., Late Tertiary volcanic stratigraphy of northern Central America. Bull Volcanol 41, p. 601–607, (1980).
- [30] Hernández, W., Jaroslav, L., Chavez, J., Pécskay, Z., Šebesta, J., Geology and volcanic evolution in the southern part of the San Salvador Metropolitan Area, Journal Geosciences, 56, p. 105-138, (2011).
- [31] Reynolds, JH., Timing and sources of Neogene and Quaternary volcanism in south-central Guatemala. J Volcanol Geotherm Res 33, p. 9–22, (1987).
- [32] Rose, W., Conway, F., Pullinger, C.R., Deino, A., McIntosh, W.C., An improved age framework for late Quaternary silicic eruptions in northern Central America: Bulletin of Volcanology, v. 61, p. 106 120, (1999).
- [33] Consorcio Salvadoreño, italtekna Italconsult, Geotérmica Italiana, Estudio vulcanológíco, Programa di Ricostruzione. Republica Italiana Ministero degli Affari Esteri Direzione Generale per la Cooperazione allo Sviluppo. Open file report, Ministerio de Obras Públicas, San Salvador, p. 1–88, (1988).
- [34] Weber, H.S., Wiesemann, G., Lorenz, W., and Schmidt-Thome, 1978, Mapa geologico de la Republica de El Salvador (América Central), 1:100,000. Bundesanstalt fur Geowissenschaften und Rhhstoffe, Hannover.
- [35] Servicio Nacional de Estudios Territoriales, Informe sobre la sismicidad ocurrida en el Lago de Ilopango durante marzo de 2006 y breve historia de años anteriores. p. 1, (2006).
- [36] Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), Actividad de la Caldera de Ilopango, durante el año 2011. p. 3-4, (2011).
- [37] Dirección General del Observatorio Ambiental (DGOA), Actividad sísmica en la zona del volcán de Ilopango, durante el año 2015. p. 2-5, (2015).
- [38] García, M. A., Instrumentación Electrónica, p. 379-396, (2014).
- [39] GARMIN, Marine product selection guide transducer, instruments and sensors, p. 12, (2008).

BIBLIOGRAFÍA 57

[40] Sea-Bird Electronics (SBE), Manual de operación, SBE 25 Sealogger CTD, p. 7-66, (2010)