



Universidad San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Geomática

**EVALUACIÓN DE DATOS DEL ALTÍMETRO LÁSER ICESAT-2 PARA IDENTIFICAR
CAMBIOS TEMPORALES EN EL NIVEL DEL AGUA DEL LAGO DE AMATITLÁN**

Ing. Tom Hanks Francisco Luna Grajeda
Asesorado por el MSc. Ing. Edson Hernández

Guatemala, marzo de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE DATOS DEL ALTÍMETRO LÁSER ICESAT-2 PARA IDENTIFICAR
CAMBIOS TEMPORALES EN EL NIVEL DEL AGUA DEL LAGO DE AMATITLÁN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ING. TOM HANKS FRANCISCO LUNA GRAJEDA
ASESORADO POR EL MSC. ING. EDSON HERNÁNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA GEOMÁTICA

GUATEMALA, MARZO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Inga. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
DIRECTOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
EXAMINADORA	Mtra. Lcda. Sara Michelle Catalán Armas
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

EVALUACIÓN DE DATOS DEL ALTÍMETRO LÁSER ICESAT-2 PARA IDENTIFICAR CAMBIOS TEMPORALES EN EL NIVEL DEL AGUA DEL LAGO DE AMATITLÁN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Posgrado, con fecha 07 de noviembre de 2020



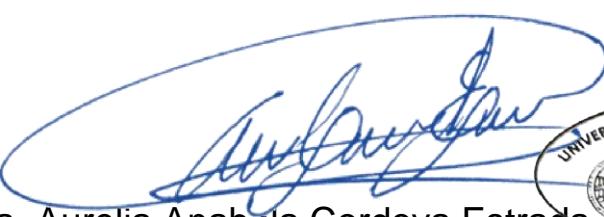
Ing. Tom Hanks Francisco Luna Grajeda

Decanato
Facultad de Ingeniería
24189101- 24189102
secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.341.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **EVALUACIÓN DE DATOS DEL ALTÍMETRO LÁSER ICESAT-2 PARA IDENTIFICAR CAMBIOS TEMPORALES EN EL NIVEL DEL AGUA DEL LAGO DE AMATITLÁN**, presentado por: **Ing. Tom Hanks Francisco Luna Grajeda**, que pertenece al programa de Maestría en ciencias en Geomática después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Decana

Guatemala, marzo de 2023

AACE/gaoc



Guatemala, marzo de 2023

LNG.EEP.OI.341.2023

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

"EVALUACIÓN DE DATOS DEL ALTÍMETRO LÁSER ICESAT-2 PARA IDENTIFICAR CAMBIOS TEMPORALES EN EL NIVEL DEL AGUA DEL LAGO DE AMATITLÁN"

presentado por **Ing. Tom Hanks Francisco Luna Grajeda** correspondiente al programa de **Maestría en ciencias en Geomática**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Edgar Dávila
Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala, 19 de abril 2022.

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

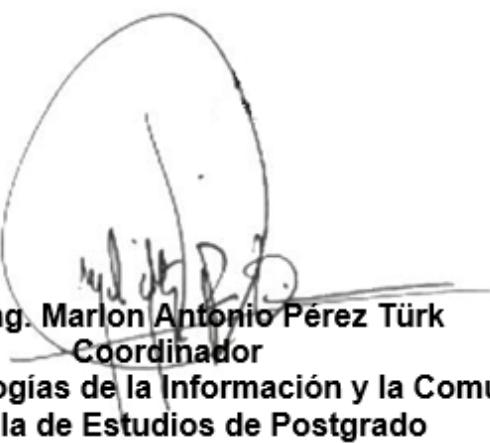
M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el **TRABAJO DE GRADUACIÓN** titulado: " EVALUACIÓN DE DATOS DEL ALTÍMETRO LÁSER ICESAT-2 PARA IDENTIFICAR CAMBIOS TEMPORALES EN EL NIVEL DEL AGUA DEL LAGO DE AMATITLÁN" del estudiante **Tom Hanks Francisco Luna Grajeda** quien se identifica con número de carné **2801911700101** del programa de **Maestría en Geomática**.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,



Mtro. Ing. Marlon Antonio Pérez Türk
Coordinador

Maestría en Tecnologías de la Información y la Comunicación
Escuela de Estudios de Postgrado



ASESOR

Guatemala, 12 de febrero de 2022

Maestro
Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrados
Presente

Estimado M.A. Álvarez Cotí:

Reciba un cordial y atento saludo, a la vez aprovecho la oportunidad para hacer de su conocimiento que en mi calidad como Asesor del Ingeniero en Gestión Ambiental Loca **Tom Hanks Francisco Luna Grajeda**, quien se identifica con carnet **2801911700101**, he revisado el Trabajo de Graduación titulado: “**EVALUACIÓN DE DATOS DEL ALTÍMETRO LÁSER ICESAT-2 PARA IDENTIFICAR CAMBIOS TEMPORALES EN EL NIVEL DEL AGUA DEL LAGO DE AMATITLÁN**”, del programa de **Maestría en Geomática** de esta Escuela de Postgrado, **por lo cual el trabajo revisado cuenta con mi aprobación**.

Agradeciendo de antemano la atención a la presente, me suscribo.

Atentamente.

“*Id Y Enseñad A Todos*”


Edson Toniño Hernandez Mazariegos
Ingeniero Agrónomo en RNR
Colegiado No. 6354
Ing. Agr. MSc. Edson Toniño Hernandez Mazariegos
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por mi vida, por ser quien me ha guiado y acompañado en todo momento, por darme fuerzas para alcanzar esta meta y quién me ha enseñado a luchar siempre con amor.

Mi mamá

Por su amor incondicional, su esfuerzo de todos los días para apoyarme a salir adelante y lograr esta meta, por escucharme en los buenos y malos momentos, por su ejemplo y por darme los mejores consejos. .

Mis hermanas

Por su sincero amor, por estar siempre para escucharme y aconsejarme en las decisiones más importantes de mi vida, por su motivación e inspiración para cumplir mis sueños.

Mi novia

Por llenarme de amor y esperanza cada día desde que la conocí, por motivarme a terminar esta meta y por estar para mí en todo momento.

Mis amigos

Por ser los ángeles que Dios ha puesto en mi camino para apoyarme en las diversas situaciones de mi vida, su amistad y por su sincero cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por brindarme las oportunidades para desarrollarme académicamente.

Catedráticos

Por ser ejemplo, por ser parte de mi superación y formación personal.

Asesor

MSc. Ing. Edson Hernández por su valiosa asesoría, revisión y colaboración en el presente trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
GLOSARIO.....	V
RESUMEN	VII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS	XI
OBJETIVOS	XV
HIPÓTESIS	XVII
MARCO METODOLÓGICO	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. ANTECEDENTES.....	1
2. JUSTIFICACIÓN	5
3. ALCANCES	7
3.1. Resultados	7
3.2. Técnicos	7
3.3. Investigativos	7
4. MARCO TEÓRICO	9
4.1. Importancia del monitoreo de altimetría en cuerpos de agua continentales.....	9
4.2. Sistemas información geográficas en el monitoreo de recursos naturales.....	10
4.3. Percepción remota satelital.....	10

4.3.1.	Sensores.....	11
4.4.	Altimetría satelital laser.....	12
4.5.	ICESat-2.....	13
4.5.1.	Descripción de ATLAS / ICESat-2	14
4.5.2.	Conjunto de datos ATL13 para cuerpos de agua continentales	17
4.5.2.1.	Parámetros.....	18
4.5.2.2.	Openaltimetry	19
4.6.	Entorno de la zona de estudio	20
4.6.1.	Lago de Amatitlán	23
4.6.2.	Características hidrológicas del lago de Amatitlán	23
4.7.	Acuerdo Gubernativo 179-2001	24
5.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	27
5.1.	Identificación y depuración de datos atípicos.....	37
5.2.	Nivel medio de la superficie del lago de Amatitlán	38
5.3.	Precisión del modelo.....	39
5.4.	Correlación del modelo.....	40
5.5.	Exactitud del modelo.....	41
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	43
	CONCLUSIONES	47
	RECOMENDACIONES.....	49
	REFERENCIAS.....	51
	ANEXOS.....	53

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Flujo de trabajo de procesamiento de datos ICESat-2.....	16
2.	Diagrama de flujo general del algoritmo de ATL13.....	19
3.	Disponibilidad de datos en la plataforma de OpenAltimetry.....	20
4.	Mapa de ubicación del lago de Amatitlán	22
5.	Mapa de amenazas por inundaciones	25
6.	Datos ICESat-2 para el 30 de octubre del año 2018 pista 957 y 965	29
7.	Datos ICESat-2 para el 01 de marzo del año 2019 pista 957 y 965	30
8.	Datos ICESat-2 para el 27 de febrero del año 2020 pista 957 y 965.....	31
9.	Datos ICESat-2 para el 27 de agosto del año 2020 pista 965.....	32
10.	Datos ICESat-2 para el 25 de noviembre del año 2020 pista 957	33
11.	Datos ICESat-2 para el 26 de noviembre del año 2020 en la pista 965 .	34
12.	Datos ICESat-2 para el 24 de febrero del año 2021 pista 957	35
13.	Datos ICESat-2 para el 26 de mayo del año 2021 pista 965.....	36
14.	Depuración de datos atípicos	37
15.	Diagramas de dispersión de los datos ICESat-2 y datos en campo	41

TABLAS

I.	Resumen de cobertura y órbita de ICESat-2.....	14
II.	Especificaciones clave de rendimiento de ICESat-2 / ATLAS.....	15
III.	Número de huellas del grupo ATL13 disponibles para el área del Lago de Amatitlán	28

IV.	Nivel medio del lago de Amatitlán.....	38
V.	Precisión de los datos.....	39
VI.	Nivel medio del lago de Amatitlán y correlación de los datos	40
VII.	Cálculo de exactitud de los datos	42

GLOSARIO

Altimetría	Rama de la topografía que mide las diferencias de nivel o elevación de un terreno o cuerpo de agua, representa distancias verticales medidas a partir de un plano horizontal de referencia.
AMSA	Autoridad para el manejo sustentable de la cuenca y del lago de Amatitlán.
Cuerpos de agua continentales	Se refiere a los ríos, lagos, lagunas, reservas, embalses, entre otros. Aguas continentales, es decir que se encuentran en el interior de las zonas costeras.
DAAC	(Por sus siglas en inglés) Centro de Archivo Activo Distribuido
Exactitud	Se define como la valoración del error de una medición.
INDE	Instituto Nacional de Electrificación
NASA	(Por sus siglas en inglés) Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio

NSIDC	(Por sus siglas en inglés) Centro Nacional de Datos de Hielo y Nieve
Precisión	Es el grado con el cual la exactitud concreta una medición. Su representación suele ser cualitativa.
RMSE	Error cuadrático medio
Sensor láser	Sistema que tiene la capacidad de captar datos por medio de variaciones de luz, la cual es emitida como una radiación compuesta de ondas de igual longitud.
Sensoramiento remoto	Técnica que se usa para derivar información sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de los objetos sin entrar en contacto físico directo.
SIG	Sistemas de Información Geográfica

RESUMEN

El cambio climático, el aumento de la expansión urbana y la degradación ambiental son claramente problemas que afectan la disposición y distribución de los recursos hídricos. Es por ello la importancia del monitoreo constante de los mismos para garantizar la seguridad de quienes interactúan con ellos. El monitoreo de los cuerpos de agua en Guatemala ha sido un tema de falta de gestión por parte de las instituciones públicas, brindando registros limitados de información, la cual debe ser utilizada como base para la toma de decisiones a corto, mediano y largo plazo.

En respuesta, el propósito de este estudio es proponer un enfoque innovador para proporcionar información gratuita y abierta al público, en particular datos altimétricos de un cuerpo de agua natural, con el uso de datos disponibles obtenidos con técnicas de teledetección.

El método y su evaluación se desarrollaron para el Lago de Amatitlán, ubicado en el departamento de Guatemala, Guatemala. Por su importancia en diversos temas sociales, científicos y económicos, también es un recurso natural con un alto grado de intervención antropológica.

Para llevar a cabo el estudio se utilizaron datos de la tecnología del sensor ATLAS a bordo del satélite ICESat-2 para el período 2018-2021. Para verificar los resultados obtenidos fue necesario contar con datos en campo, estos se obtuvieron por medio del Instituto Nacional de Electrificación (INDE), quienes

monitorean el nivel del lago por medio de una estación ubicada en las compuertas que separan el caudal del lago con el río Michatoya.

Según la disponibilidad de las lecturas de ICESat-2, se identificaron ocho fechas de recopilación de datos, correspondientes a las unidades de tratamiento para este estudio. Se realizó un análisis para cada unidad, que a su vez se centró en los resultados obtenidos utilizando los datos de haz fuerte y débil del sensor. En cada una de estas unidades se calculó el nivel medio del Lago, se encontraron para las ocho fechas de adquisición de datos, un nivel máximo de 1189.11 msnm y un mínimo de 1188.038 msnm.

En este estudio, es importante entender la diferencia entre las lecturas de cada unidad analítica, lo que demuestra en promedio, una desviación estándar máxima de 3.3 cm, lo que evidencia alta precisión entre los datos de cada fecha de adquisición de datos del sensor para el lago de Amatitlán.

Además de conocer la precisión de las lecturas de altimetría obtenidas con este método basado en los datos de ICESat-2, también era necesario validar los resultados contra los datos del nivel del agua del lago Amatitlán recolectados in situ (elevaciones diarias medidas en la estación compuertas del lago del INDE). Las correlaciones fueron 0,989 y 0,990 para haces débiles y fuertes, respectivamente, lo que indica que el método es lineal, es decir, está fuertemente correlacionado con las grabaciones de campo. También se determinó que el método representa un grado alto de exactitud en relación con los datos de campo, con un error cuadrático medio (RMSE) de 37 cm para el haz débil y 38 cm para el haz fuerte. La diferencia de error entre las dos vigas no fue significativa.

Este estudio presenta un método para determinar el nivel del agua del lago Amatitlán, produciendo resultados confiables y datos de libre acceso al público, facilitando el monitoreo de este cuerpo de agua y brindando insumos para las decisiones de manejo de este recurso, basado en lecturas de altimetría satelital de alta precisión y exactitud.

X

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE PREGUNTAS ORIENTADORAS

Es importante reconocer que los fenómenos naturales causados por el cambio climático pueden ser perjudiciales para cualquier región, al mismo tiempo que representan una amenaza mayor para las poblaciones más vulnerables debido a las condiciones desfavorables inherentes a los territorios ocupados. La importancia de contar con información y su análisis permanente, puede predecir o mitigar dichos riesgos.

Esto se refleja en el lago Amatitlán, donde la dinámica actual, que forma la base histórica para predecir fenómenos futuros, no es suficiente debido a la ausencia de información actualizada y de acceso público sobre el monitoreo de los niveles de agua en el lago. Tener estos datos disponibles supone prever situaciones adversas, producto del aumento o disminución de los niveles de los lagos, como una inundaciones o sequías. Las inundaciones en el área cercana al lago son recurrentes, originalmente por la crecida del río Villa Lobos y su estancamiento en el ingreso al lago. Los altos niveles del lago pueden incursionar en potencializar los efectos de la crecida del río en épocas de lluvia.

Debido a la incertidumbre provocada por el alto crecimiento poblacional que interactúa con el lago Amatitlán, los efectos del cambio climático y la demanda de servicios ambientales, el monitoreo de este recurso es necesario; sin embargo, ha recibido poca atención, principalmente por parte de las autoridades competentes.

Si bien se cuenta con datos de altimetría a través de los registros levantados por el INDE, el acceso a dicha información requiere una compensación económica debido al costo del proceso de monitoreo del nivel del lago. La realización de esta actividad requiere inversión en mantenimiento y equipamiento, además de la contratación de personal calificado para la coordinación y mantenimiento.

Es importante tener en cuenta que el lago de Amatitlán se caracteriza por ser un cuerpo de agua fuertemente influenciado por la mayor área metropolitana de Guatemala, recibe una carga constante de contaminación, además de las necesidades existentes de los servicios que brinda a la población. El comportamiento natural de este cuerpo de agua sufre altos impactos por la población, debido principalmente a la construcción de un relleno en el pasado que sirvió como paso del ferrocarril, dividiendo el lago en dos partes. Actualmente el lago se utiliza como embalse natural para las plantas de generación eléctrica que funcionan en cauce del río Michatoya: Palín II, Jurún Marinalá y El Salto.

La falta de conocimiento sobre el tema y métodos alternativos que representen una menor inversión de tiempo y recursos, sugiere que se ha prestado poca atención al registro de los niveles del lago. Es importante señalar que este tipo de información facilita la toma de decisiones en beneficio de quienes interactúan con el lago.

Es por ello que se ven efectos directos, producto de escasa información disponible del lago, en cuanto al monitoreo de sus niveles. Estos impactos incluyen la creciente vulnerabilidad de las comunidades aledañas, el desconocimiento de los impactos ambientales y climáticos en dichos cuerpos de agua, la falta de toma de decisiones para implementar acciones a corto y largo

plazo, y el desinterés en la inversión y apoyo de instituciones gubernamentales y no gubernamentales en proyectos de saneamiento y mitigación de riesgos del lago.

El presente trabajo de investigación tiene como objeto principal responder la siguiente interrogativa.

¿Es factible la determinación del nivel del agua del lago de Amatitlán por medio de un método alternativo indirecto al utilizar datos de altimetría laser del satélite ICESat-2?

De la anterior interrogante surgen las siguientes preguntas específicas, las cuales permiten definir la dirección correcta de este estudio.

- ¿Cuál es la dinámica del nivel de agua del lago de Amatitlán para los diferentes periodos identificados utilizando datos de altimetría laser del satélite ICESat-2?
- ¿Cuál es la precisión de los datos obtenidos de este nuevo método, utilizando tecnología satelital láser, de acuerdo con los períodos determinados?
- ¿Cuál es el coeficiente de correlación y la exactitud del método al compararlo con la metodología de estimación de datos in situ?

La presente investigación se desarrolló en el lago de Amatitlán, para el monitoreo de los niveles de agua en el mes de octubre del 2018 a mayo del 2021, con tecnología láser de sensoramiento remoto de ICESat-2.

OBJETIVOS

General

Estandarizar y evaluar un método de aplicación de altimetría láser del satélite ICESat-2 para la determinación periódica del nivel del agua del lago de Amatitlán con datos del año 2018 al 2021.

Específicos

1. Determinar los niveles del agua del lago de Amatitlán del año 2018 al 2021 utilizando datos provenientes de tecnología satelital de ICESat-2 con el sistema altimétrico láser ATLAS, grupo de datos ATL13 versión 4.
2. Evaluar la precisión de los datos obtenidos del altímetro láser a bordo del satélite ICESat-2 para cada fecha de adquisición de los datos, en la determinación del nivel medio del lago de Amatitlán.
3. Evaluar el coeficiente de correlación y grado de exactitud del método al compararlo con la metodología convencional de estimación de datos en campo para el lago de Amatitlán.

HIPÓTESIS

Con esta investigación se busca verificar si es factible la aplicación de la tecnología de altimetría láser del satélite ICESat-2 para el monitoreo periódico del nivel superficial del agua en metros sobre el nivel del mar del lago de Amatitlán, comparado con las mediciones realizadas en campo.

MARCO METODOLÓGICO

- Tipo de investigación

La investigación presentada en este documento se considera de tipo cuantitativa, los resultados son datos de altimetría los cuales son numéricos.

- Diseño de investigación

El diseño de investigación es experimental, debido a que consistió en evaluar un método para realizar el monitoreo de altimetría del Lago de Amatitlán, método innovador basado en datos de un sensor altimétrico láser respecto a un método convencional en campo.

- Procedimiento metodológico

Siguiendo los objetivos planteados para este estudio, se determinó el nivel medio del lago de Amatitlán para el periodo del año 2018 al 2021, a través de un método de obtención y tratamiento de datos altimétricos del satélite ICESat-2 L3A (ATL13 v.4). Este proceso se desarrolló en seis grandes fases que se describen a continuación.

- Fase I. Análisis y comprensión conceptual

Para realizar este estudio, fue importante comprender la estructura y el funcionamiento del satélite ICESat-2 y su sistema de información ATLAS, además de identificar la aplicación y caracterización de estos datos resultantes en el

monitoreo ambiental, así comprender y conceptualizar el potencial informativo de dichos métodos con el objetivo de monitorear el lago de Amatitlán.

- Fase II. Recopilación de información

En esta etapa se descargó y compiló el dataset ATL13, tomando como referencia los límites del área de estudio, y posteriormente esta información fue utilizada para su procesamiento, lo que definió la altimetría superficial del lago de Amatitlán en diferentes períodos de tiempo.

- Para definir el área del lago de Amatitlán se utilizó una base de datos que proporciona polígonos costeros de todos los lagos del mundo con una superficie de al menos 10 hectáreas. (HydroLAKES versión 1.0), este se descargó en formato vectorial, y posteriormente se pasó a extraer los límites del lago Amatitlán. Este límite preliminar se comparó y editó con imágenes satelitales recientes de Google Earth y modelos vectoriales locales del lago.
- Para este estudio se realizó un análisis previo de la cobertura del satélite ATLAS / ICESat-2 L3A, versión 4. Esta información está disponible a través de la página de National Snow and Ice Data Center (NSIDC).
- Se realizó la verificación de la temporalidad de los datos a partir de octubre del año 2018, fecha en la cual el satélite inició a capturar datos de altimetría, ocho fechas estaban disponibles para la unidad de investigación: una lectura en noviembre de 2018, en marzo de 2019, en febrero y agosto de 2020, dos en noviembre de 2020, y una en febrero y mayo de 2021.

- Posterior a esto se procedió a la descarga de los datos disponibles para este límite y durante el periodo 2018 - 2021. El acceso al conjunto de datos de altimetría del satélite ICESat-2 se realiza a través del portal Openaltimetry.com, que requiere un nombre de usuario y contraseña para descargar los datos ATL13 correspondientes al nivel de tratamiento más alto. El archivo de descarga se encuentra en un formato csv el cual contiene campos de coordenadas, datos de elevación ortométrica.
- El archivo csv descargado se convierte en un modelo de datos vectorial, de tipo punto.
- Del universo de entidades espaciales descargadas en el periodo de tiempo de octubre 2018 a mayo 2021, Se definieron las fechas adquisición de datos, según la disponibilidad de los mismos. Se tomó en cuenta que el satélite tiene un ciclo de repetición de 91 días (tiempo que tarda en pasar por el mismo punto), no obstante, para algunos ciclos estos datos no están disponibles. Si bien para el área de estudio trascurren dos pistas y la resolución temporal del satélite es de aproximadamente 91 días, la recopilación de datos para el área es irregular, proporcionando variabilidad en el número de huellas y el tipo de haz (fuerte o débil) registrado. Esto se debe a que el número de fotones detectado por el sensor depende de factores como la reflectividad de la superficie y la cobertura de nubes en el momento en que el satélite hace su recorrido.

- Los datos para cada fecha de adquisición se dividen en dos grupos, haz fuerte y haz débil, los cuales son analizados por separado en esta investigación.
- Fase III. Procesamiento de datos

La información obtenida del conjunto de datos ATL3 del sistema ATLAS reporta el nivel del agua del lago Amatitlán en dos pistas ubicadas dentro de los límites del lago Amatitlán, la 957 y 965 según la trayectoria terrestre de referencia (RGT, por sus siglas en inglés) utilizada por ICESat-2. Con estos datos, se procedió a realizar las operaciones que se describen a continuación, se utilizó el software QGIS para poder procesar esta información y analizarla en consecuencia sin pagar derechos de licencia.

- Se georreferenció la información en el software SIG (QGIS), combinando los datos de las dos trayectorias para generar un conjunto de datos para cada fecha de adquisición, luego cada conjunto combinado se divide en haces fuertes y débiles, al finalizar, el modelo vectorial resultante se exporta como una tabla de texto para realizar el análisis estadístico correspondiente. Finalmente, estos datos han sido editados para su presentación.
- Para el análisis y presentación de la información final se mantuvo el sistema de referencia de coordenadas geográficas, sin embargo, para uso del usuario final, el producto se generó al utilizar el sistema de referencia de coordenadas de proyección Transverse Mercator de Guatemala.

- Fase IV. Determinación de altura de superficie del lago

Según Yuan (2020) el método para determinar el nivel de agua para una serie temporal de datos de un lago utilizando ICESat-2, se compone de tres pasos principales: se identifican las zonas o huellas de cobertura de los datos para el conjunto de datos ATL13 dentro del límite del lago, posteriormente se descartan los valores atípicos (método intercuantil) y se promedian las alturas de la superficie de cada una de las huellas identificadas dentro de los límites del lago para cada tiempo de observación, finalmente se identifica la incertidumbre de medición por medio de la desviación estándar de los datos a lo largo de la ruta.

En esta fase se buscó determinar por medio de la depuración, análisis y procesamiento de los datos, el nivel medio del lago para cada fecha de adquisición de datos identificada, además de definir los datos disponibles de monitoreos en campo.

- Para encontrar los datos respecto a valores atípicos, se utilizó un análisis estadístico por medio del método de rango intercuartílico (IQR) en las distintas temporalidades disponibles. Específicamente para determinar el valor mínimo y máximo se adicionó y restó al primer y tercer cuartil el valor de 1.5 veces la IQR, como se muestra a continuación Yuan, (2020):

$$\text{Datos atípicos} = \text{AML} < Q1 - \text{IQR} * 1.5 \text{ o } 1.5 * \text{IQR} + Q3 < \text{AML}$$

- Luego se procedió a eliminar los datos atípicos utilizando para los procesos posteriores los datos típicos.

- Posterior a eliminar los datos atípicos, en primer lugar, se determinó el promedio de altura de la superficie del lago para cada unidad de tratamiento la cual corresponde a las fechas de adquisición de datos clasificadas en haz fuerte y débil, según Giribabu (2020) es importante clasificar los datos de acuerdo al potencial de energía a la cual se emite el haz, respondiendo a los resultados obtenidos en la metodología utilizada por este autor, en donde el análisis identifica variaciones entre el haz fuerte y el débil.
 - Se utilizó desviación estándar como método estadístico para determinar la incertidumbre de medición de las huellas del altímetro a lo largo de las pistas. Concluyendo como índice de incertidumbre, la mediana de la desviación estándar para cada unidad de tratamiento. (Yuan, 2020)
 - Como parte de este estudio se gestionó la obtención de datos en campo, de cotas diarias del nivel del agua del lago de Amatitlán obtenidas de la estación limnimétrica ubicada en las compuertas del río Michatoya, salida del Lago. Información administrada y registrada por el departamento de hidrología de la Empresa de Generación de Energía Eléctrica (EGEE), del Instituto Nacional de Electrificación (INDE).
- Fase V. Presentación de datos

Se generó una base georreferencia de datos de altura del lago, por cada unidad de tratamiento, que corresponden a las ocho fechas de adquisición de datos disponibles, clasificadas en haz fuerte y débil.

- Los instrumentos por utilizar en esta investigación se reducen a herramientas digitales. Los datos utilizados fueron proporcionados por un sensor altimétrico y datos históricos de lecturas en campo proporcionados por el instituto Nacional de Electrificación (INDE).
- Fase VI. Evaluación

Para el presente trabajo de investigación, se muestran a continuación las técnicas y métodos de análisis de información, con lo que se determinó el error medio y absoluto del método, y la correlación de los datos obtenidos de satélite ICESat-2 y datos en campo obtenidos por un método convencional.

- Para poder evaluar la correlación que existe entre estos dos métodos de monitoreo del nivel del lago, se aplicó el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson. El coeficiente de correlación genera un rango de valores de -1 a 1 en donde un valor 0 nos representa que no hay ningún tipo de relación entre los dos métodos evaluados, un valor cercano a -1 nos indicará que es indirectamente proporcional una medición con la otra y un valor 1 o cercano mostrará mayor asociación de ambos métodos.
- Se determinó el error cuadrático medio (RMSE) de los datos para poder determinar la incertidumbre de las observaciones del nivel de agua del lago obtenidos con el grupo de datos ATL13 de ICESat-2 en relación con los datos de las observaciones in situ. Como fase inicial se hizo recopilación de los datos disponibles de mediciones in situ, datos obtenidos de la estación de hidrométrica del Instituto Nacional de Electrificación (INDE).

INTRODUCCIÓN

Es extremadamente importante registrar y analizar la disponibilidad de las cantidades de agua superficial. La variabilidad de los recursos hídricos es de importancia crítica en cuestiones sociales y científicas. El agua almacenada en los lagos es un indicador sensible de las precipitaciones y representa un potencial para estudiar la dinámica de los recursos hídricos, el cambio climático e impactos humanos. (Cretaux y Birkett, 2006)

Los niveles de agua en los lagos se miden tradicionalmente por métodos *in situ*. Estos métodos tradicionales requieren recursos humanos y financieros. Teniendo en cuenta que la mayoría de los lagos de todo el mundo están ubicados en lugares remotos, muchos de ellos no se monitorean de forma constante, especialmente en los países en desarrollo. Sin embargo, el desarrollo científico y tecnológico de las últimas décadas ha avanzado considerablemente permitiendo contar con medios alternativos y complementarios, que hacen posible la adquisición continua de datos de alta precisión y validez, para el estudio de aguas continentales. (Mazariegos, 2009)

La altimetría satelital ofrece las ventajas del día/noche y la capacidad para todo clima en la medición de cambios relativos del nivel de lagos a escala global. La altimetría satelital ha sido diseñada para monitorear el nivel del mar en áreas de océano abierto. (Birkett, 1995) Sin embargo, desde hace unos años, esta tecnología también se utiliza para la medición de niveles de agua en embalses, humedales y en general cualquier masa de agua interior. (Schwatke *et al.*, 2015)

El satélite de elevación de hielo, nubes y tierra-2 (ICESat-2), equipado con el sistema avanzado de altimetría láser de terreno (ATLAS), se lanzó el 15 de septiembre de 2018. El objetivo científico principal es monitorear los glaciares polares, el hielo marino y los bosques. También se puede utilizar para monitorear cuerpos de agua continentales. (Markus *et al.*, 2017)

El Lago de Amatitlán es un cuerpo de agua que por su ubicación geográfica es de gran importancia, principalmente para la región metropolitana de Guatemala. Representa diversos servicios para la población de esta región. Es por ello es importante conocer el estado de este recurso hídrico de manera predecible, con información veraz, complementaria y utilizable.

En este estudio se da a conocer el levantamiento realizado para determinar la altura promedio de la superficie del lago de Amatitlán en ocho fechas de recolección de datos, utilizando altimetría láser a bordo del satélite ICESat-2, y la correspondiente evaluación de los resultados, lo que valida este método propuesto, con registros en campo.

1. ANTECEDENTES

Al entender la función del ciclo del agua, se sabe que, tanto los factores climáticos, como la intervención humana en este sistema pueden producir cambios. Como señala Yuan (2020), los indicadores directos de estos impactos son los cambios en los niveles de agua del lago o embalse. Aplicar la teledetección para gestionar y monitorear estos cambios es una opción para reducir costos y actualizar sistemáticamente información útil para diversos análisis.

Como explica Schwatke (2015), los métodos de altimetría satelital se diseñaron originalmente para recopilar información y monitorear cambios en el nivel del mar, principalmente en áreas de mar abierto. No obstante, como mencionan estos autores, tiene otras aplicaciones en el seguimiento de masas de agua continentales a través de series temporales de imágenes de satélite del territorio estudiado, así como datos altimétricos.

Para que un satélite registre datos de altitud, debe contar con un altímetro, el cual transmite y recibe señales que llegan a la superficie terrestre y determina la distancia registrando el tiempo transcurrido. (Yuan, 2020)

Durante algún tiempo se ha desarrollado una gama de sensores en satélites para medir datos de altimetría de cuerpos de agua continentales utilizando tecnología de radar y láser, pero algunos de estos sensores ahora se han mejorado, caso particular es el sistema de satélite ICESat que cuenta con un LiDAR GLAS (Earth Science Laser Altimeter System) como uno de los precursores de su instrumento principal, lo que permite observaciones continuas

y globales de la superficie de la Tierra, como se describe la guía de usuario de los datos ATL13 v. 4 Jasiski (2021).

En 2018, este satélite fue reemplazado por el satélite CESat-2, que tiene como instrumento principal el Sistema de Altímetro Láser Topográfico Avanzado, cuyo acrónimo en inglés es ATLAS, lanzado a finales de 2018, y entre cuyos principales objetivos se encuentra la determinación la altimetría de los polos glaciares, hielo marino y bosques (Markus, 2017). Se ha demostrado que es adecuado para el monitoreo exitoso de cuerpos de agua continentales de más de 10 km², como lo demostraron. (Markus, 2017; Yuan, 2020; Zhang, 2019)

ATLAS recopila información a nivel mundial, la misión del satélite ICESat-2 ha generado datos desde 2018 hasta la fecha, en donde a partir de 2019 se hicieron públicos los datos recogidos. A pesar de las estimaciones recientes de información, ya se identifican ciertos análisis y estudios donde utilizan y evalúan esta nueva tecnología láser para levantamiento de niveles en cuerpos de agua continentales. (Martino, 2019)

Se pueden derivar varios estudios y aplicaciones de estos datos proporcionados por el sistema ATLAS, al evaluar las capacidades de este sensor y determinando características tridimensionales clave sobre o debajo de la superficie, por ejemplo: comprender el dosel del bosque. (Gwenzi, 2016 y Glennie, 2020) O determinar la profundidad del agua en mediciones de áreas costeras (Albright y); con la capacidad de integrar esta información con el aprendizaje automatizado y otros tipos de información satelital, por ejemplo, la investigación de Lee (2020) identificó la altura del dosel forestal como un indicador importante de las características del bosque.

Como describen Liu *et al.* (2020), uno de los conjuntos de datos proporcionados por la misión ICESat-2 es el conjunto de datos ATL03, que contiene datos de latitud, longitud y altitud determinados por interacciones de fotones con la superficie de la tierra y otras características. Coberturas como vegetación y cuerpos de agua.

Además de reconocer las tecnologías disponibles para dicho monitoreo satelital, importante a considerar en esta investigación es la forma de evaluar la precisión y correlación respecto a otro tipo de métodos *in situ*, en donde reflejen mediciones de nivel de agua. Sin embargo, dependerá del territorio y la capacidad con la que se cuente, reflejado esto en los equipos y sistemas de medición disponibles. De no contar con estos datos Yuan (2020) propone para determinar la precisión del método utilizando ICESat-2, tomar en cuenta la incertidumbre de medición del cuerpo de agua, calculada a través de la desviación estándar de datos de altura en el área de interés. Una incertidumbre baja refleja una precisión alta.

Poco se conoce en la región sobre estudios enfocados en la evaluación de niveles y monitoreo de cambios en las alturas de cuerpos de agua continentales, utilizando sensores remotos con tecnología láser de alta capacidad como ATLAS, sin embargo, la utilización de esta nueva tecnología, representa un gran aporte para el territorio, al tener en cuenta la diversidad de aplicaciones que se pueden desarrollar con estos datos.

Si bien ya existen estudios globales acerca de la capacidad de este satélite para la medición de niveles de agua en cuerpos continentales, como lo menciona Ryan (2020), el conocimiento de estas variaciones en los cuerpos de agua, de manera precisa, permite entender también la variabilidad climática y la demanda

humana existente, entendiendo que en cada territorio estos efectos o fenómenos se comportan de manera distinta.

Para determinar la precisión Yuan (2020) comparó los niveles obtenidos por altimetría satelital con niveles de medición de este día utilizó tres métricas de evaluación: error absoluto medio; error relativo medio; y coeficiente de correlación de Pearson.

Este estudio se usó la versión más reciente al año 2021 (versión 4), del grupo de datos ATL13, no se han encontrado estudios de análisis de altimetría utilizando esta tecnología en el lago de Amatitlán, y se pretende evaluar la precisión y exactitud de los datos en un cuerpo de agua con dimensiones reducidas (14.75) a diferencia de otros estudios previos a este, en donde los cuerpos de agua comúnmente son mayores de 15 kilómetros cuadrados.

2. JUSTIFICACIÓN

El presente estudio se desarrolla en la línea de investigación de teledetección aplicada a la identificación de cambios altimétricos en cuerpos de agua continentales.

En Guatemala, el uso de tecnología láser satelital para analizar información altimétrica de cuerpos de agua es una tecnología que revolucionará la forma actual de recolectar datos a gran escala, con enfoque en recursos hídricos, y además abre una brecha en la generación de conocimiento utilizando nuevas técnicas en el ámbito de la geomática. Para los municipios y autoridades de gobierno responsables de la gestión del lago Amatitlán, este nuevo enfoque brindará información actualizada, lo que permitirá tomar mejores decisiones en cuanto a la planificación de este recurso hídrico y la mitigación de riesgos a corto, mediano y largo plazo.

Se obtuvo un modelo actualizado de la variación periódica del nivel del agua del lago Amatitlán y recomendaciones metodológicas para sus respectivas evaluaciones. Lo que aportó una solución al desconocimiento público que existe del nivel del lago en los últimos años, generando datos con alta presión y exactitud que formarán parte de la base de datos y los análisis correspondientes.

Los sectores beneficiados son principalmente el personal municipal y de gobierno (AMSA e INSIVUMEH), quienes son los principales actores capaces de utilizar y aplicar estos datos, pero también los sectores académico y científico, que luego de obtener estos resultados pueden realizar otro tipo de análisis.

Incluir la teledetección en el proceso de recolección de información, reemplazando los métodos tradicionales que implican inversión y costo en la asignación de recursos y personal, se ve como una amplia oportunidad para evaluar la capacidad adaptativa del monitoreo de cuerpos de agua en la región. Este estudio valida la precisión y exactitud de los datos obtenidos por teledetección para un cuerpo de agua con alta intervención humana, el Lago de Amatitlán, en donde se pone a prueba el levantamiento de altimetría utilizando uno de los productos del sistema láser multi haz y micropulso de conteo de fotones con alta resolución, a bordo del satélite ICESat-2.

3. ALCANCES

3.1. Resultados

Los alcances de esta investigación tendrán como perspectiva investigativa la comprobación un método de monitoreo de cuerpos de agua continental por medio de percepción remota.

3.2. Técnicos

La altimetría espacial puede determinar y detectar cambios en el nivel de un cuerpo de agua, sin intervención humana directa, al utilizar métodos tradicionales para dicho monitoreo *in situ*, lo que permite la creación de una base sólida de referencia y datos en un escala global, y de alguna manera garantizar la periodicidad de la información en el tiempo, tomando el ejemplo del lago Amatitlán, con lo que complementa la red de medición hidrográfica actualmente existente, e incluso evaluando si este nuevo método puede demostrar alta precisión para el monitoreo de este recurso.

3.3. Investigativos

Los resultados de esta investigación evidencian la capacidad y el potencial que tienen los datos del sistema ATLAS para el monitoreo de niveles de agua en el lago de Amatitlán.

4. MARCO TEÓRICO

En este apartado que se presenta a continuación, se abordan los temas referentes al marco teórico, dando respaldo y material documental a este estudio, dentro de los temas se abordan: importancia del monitoreo de altimetría en cuerpos de agua continentales, características de ICESat-2 y el grupo de datos con el cual se pretende trabajar y la definición de las principales características del área de estudio.

4.1. Importancia del monitoreo de altimetría en cuerpos de agua continentales

Los cuerpos de agua son un recurso natural con gran potencial para generar servicios ambientales, y estos se potencian cuando se trata de lagos sumergidos en áreas urbanas, para formar parte de la ecología del territorio. Estos servicios generan una considerable contribución al incremento de la calidad de vida de las personas que habitan a sus alrededores, desde disponer del recurso hídrico para distintas finalidades, hasta proveer de servicios ambientales como el uso estético o recreacional. (Mancini *et al.*, 2012)

Debido a la importancia del recurso hídrico es indispensable el monitoreo constante y periódico de los cuerpos de agua, lo que genera información a lo largo del tiempo y permite conocer la situación histórica, actual y futura de este recurso, así generar análisis que contribuyan a el correcto manejo y toma de decisiones en la planificación territorial. El monitoreo lo constituye la utilización de herramientas y técnicas que mejor se adapten para tener resultados eficientes y certeros, sobre todo y, en primer lugar, se debe contar con una adecuada

percepción y análisis acuerpado por el conocimiento científico, para determinar integrado a otros aspectos, propuestas a soluciones aplicables y factibles a los problemas ambientales. (Rodríguez *et al.*, 2006)

4.2. Sistemas información geográficas en el monitoreo de recursos naturales

El empleo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permite generar bases de datos estructuradas ubicadas o delimitadas espacialmente en la superficie terrestre de un territorio en concreto, con la capacidad de adaptarse a distintas aplicaciones. (Flores y Marceleño, 2013)

Es el SIG una herramienta con un alto potencial, que permite gestionar, planificar y brindar insumos prácticos, que los tomadores de decisiones pueden utilizar para garantizar el desarrollo sostenible y un adecuado uso de los recursos naturales. El SIG nos permite poder hacer gestiones y monitoreos de los recursos naturales por medio de la representación y análisis geográfico de una manera simplificada, vinculando características geográficas ubicadas o delimitadas en un espacio y bases de información que detallará de una manera descriptiva las características de esos elementos, lo que permite una actualización o mejora constante de esa información. (Giménez-Frontín, González, y Da Silva, 2010)

4.3. Percepción remota satelital

Al igual que los sistemas de información geográfica, la percepción remota satelital tiene un potencial uso, incrementa con la integración de tecnologías nuevas, brinda información satelital con una amplia aplicación en diversos temas.

Como lo define Zerda, (2005) la percepción remota es la obtención de información sin tener contacto directo con el objeto de interés, esta se lleva a cabo por medio de sensores remotos.

La percepción remota, como lo menciona el párrafo anterior, es la integración de varios elementos en los que encontramos: la plataforma (satélite), que es el medio en donde se transporta el sensor; el territorio de interés y el sensor o sistema. (Torres, Campillo, y López 2015)

4.3.1. Sensores

Es comprensible que un sensor es el sistema que tiene la capacidad de registrar información, en donde el detalle a discriminar dependerá de su resolución. (Cardozo, y Da Silva, 2013) Estos dispositivos o sistemas son sensibles a la radiación de la superficie de la tierra, en el caso particular de los sensores satelitales. Se clasifican en los que reciben esta radiación como proceso natural o los que la provocan, dígase los sensores radas o láser (Panduro, 1991) en los cuales se enfoca los avances de la altimetría satelital.

Zerda (2005) define cuatro conceptos importantes, que determinan el uso de la información proveniente de un sensor remoto, como se detalla a continuación:

- Resolución espacial: representa el tamaño mínimo de objetos detectados por el sensor.
- Resolución espectral: representa el ancho de banda que es detectado por el sensor.

- Resolución radiométrica: representa el número de tonos de grises que contiene una imagen de acuerdo con el número de bits del sensor (Zerda, 2005)
- Resolución temporal: es el rango de tiempo en que se registra información de un mismo territorio por el sensor. (Zerda, 2005)

4.4. Altimetría satelital laser

Para la determinación de alturas de la superficie terrestre por medio de satélites, se realiza de acuerdo con el conteo de tiempo que trascurre un pulso que sale del sistema del satélite hasta la superficie y de nuevo al regresar al sistema altimétrico, ya sea de radas o en este caso específico, de láser. Este último se basa en determinar la altura o distancia por medio de la medición del tiempo de transmisión de un impulso de láser que llega a la tierra y se remite al sensor nuevamente. (Panduro, 1991)

El satélite ICESat, que fue lanzado en el año 2002 trasportó el sistema de altímetro láser de geociencia (GLAS), presentó datos de superficie en tres dimensiones con una precisión sin antecedentes, de acuerdo con la precisión, con el objetivo principal de determinar las modificaciones a largo plazo del volumen de la capa del hielo polar. Este proceso de posición adecuada se realiza por medio del rastreo GPS y la determinación del modelo geoidal. (Schutz, *et al.*, 2005)

4.5. ICESat-2

ICESat-2 (Ice, Cloud, and land Elevation Satellite 2) es un satélite operado por la NASA, que se fue lanzado en el año 2018 con el objetivo inicial de medir la capa de hielo en su altura y espesor, las nubes, además de la topografía de la tierra y elementos como la vegetación. De órbita polar con inclinación de 92 grados (hasta 88 grados norte y sur), a una altura de ~ 500 km con un ciclo de 91 días exactos de repetición, con un subciclo mensual para regiones polares y océanos. Diseñado para 3 años de funcionamiento con propulsor para 7 años, orbitando la tierra a una velocidad de 7 kilómetros por segundo completando una órbita en 90 minutos.

Esta misión es la segunda de las misiones de altimetría láser ICESat, este satélite trasporta únicamente un sensor o instrumento científico, sistema de altímetro láser topográfico avanzado y mejorado identificado como ATLAS (Advanced Topographic Laser Altimeter System). Este instrumento trasportado por el satélite ICESat-2 mide alturas por medio del conteo de fotones individuales de luz de un láser por medio del tiempo que tarda desde su emisión, rebote en la tierra y su regreso al sensor (Markus, 2017).

Como se menciona anteriormente y se muestra en la tabla 1, la órbita de ICESat-2 se cumple en 91 días, cuenta con un total de 1387 pistas terrestres únicas (Markus, 2017). Para el límite del territorio de estudio, se ha previsto que las pistas de interés son dos principalmente la 0965 y la 0975.

Tabla I. Resumen de cobertura y órbita de ICESat-2

Inclinación	92 grados (cobertura hasta 88 grados norte y sur)
Altitud	~ 500 km
Semieje mayor	6855 kilómetros
Cobertura	Órbita repetida exacta de 91 días con subciclo mensual para las regiones polares y océanos. Apuntando fuera del nadir operacional sobre áreas terrestres para generar una grilla densa de datos durante 2 años

Fuente: ICESat-2 NASA (2017). *Requisitos científicos, concepto e implementación.*

Es importante tomar en cuenta que la misión estuvo inactiva durante un tiempo, desde el 26 de junio hasta el 9 de julio de 2019, tiempo en el cual no se tomaron datos ni se apuntó a la pista terrestre. También resaltar que los datos recopilados entre octubre de 2018 y el 1 de abril de 2019, no están sincronizados con las rutas de seguimiento terrestres de referencia (RGT) planificadas.

4.5.1. Descripción de ATLAS / ICESat-2

El sistema de baja energía, de micropulso y multihaz, altímetro láser de conteo de fotones con alta resolución, ATLAS, a bordo del satélite ICESat-2, como se resume en la tabla II, mide por medio de un láser de coloración verde brillante en el espectro visible (532 nanómetros) este láser es emitido por el sistema y al rebotar contra la superficie terrestre es reflejado, estos fotones láser pasan a través de los filtros del sensor configurados para no percibir otro tipo de luz que no esté exactamente en esta longitud de onda.

Una de las potenciales diferencias de este satélite respecto ICESat (2003-2009) es el número de rayos láser emitidos, el sistema de ICESat-2 divide su láser en seis rayos a diferencia de su antecesor que media con un solo rayo. Permitiendo que ATLAS tenga una mejor cobertura en cuanto a superficies, estos seis rayos están agrupados en tres pares, lo que hace posible hacer evaluaciones de pendiente al procesar estas observaciones. Otra diferencia notable es el número de disparos láser por segundo, ICESat realizaba 40 disparos por segundo, mientras que ICESat-2 está configurado para lanzar 10, 000 disparos por segundo, aumentando significativamente el número de mediciones de altura con una relación aproximada de 1:130 respectivamente.

Es a través del cronometraje de los fotones láser individuales que se emiten y reciben a la distancia de 500 km entre el satélite y la superficie terrestre, que el sistema ATLAS mide los datos de altura, estrictos requisitos de precisión en tiempo, de 800 picosegundos, es decir menos de un nanosegundo (Markus, 2017).

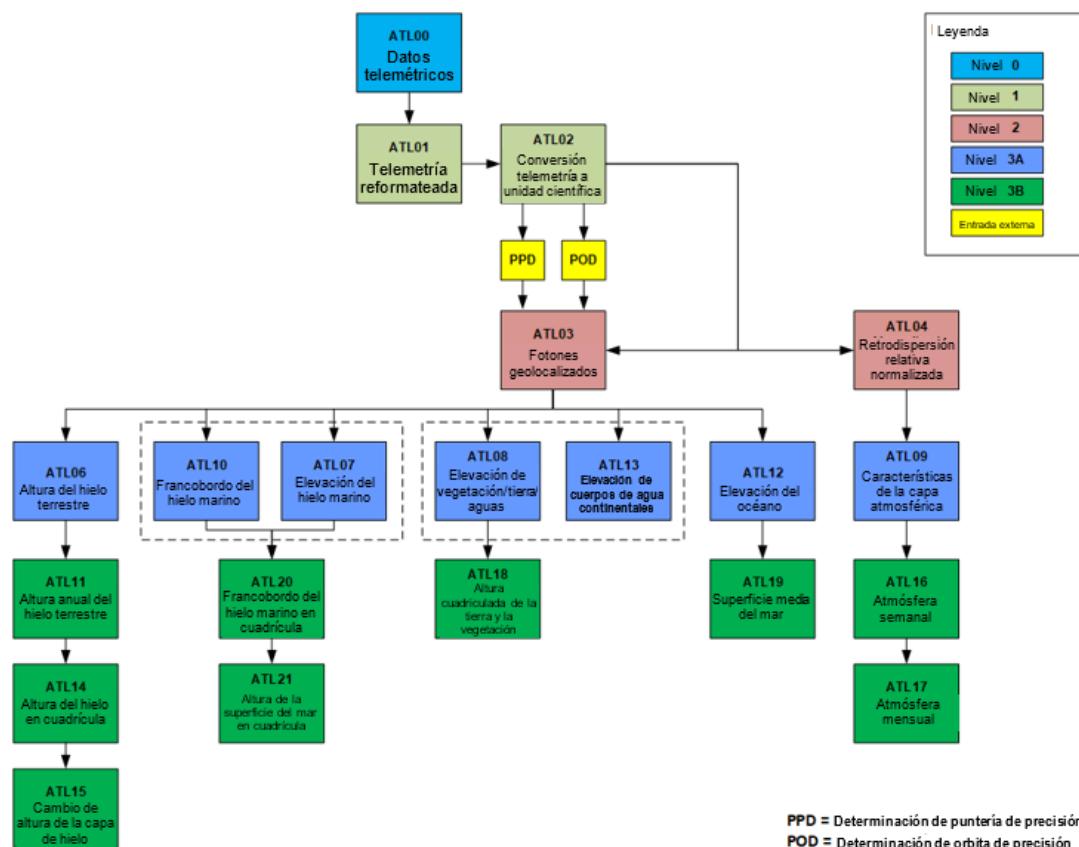
Tabla II. Especificaciones clave de rendimiento de ICESat-2 / ATLAS

Duración nominal de la misión	3 años
Numero de haces	6 organizados en 3 pares
Tamaño de la huella	13 m
Campo de visión	45 m
Frecuencia de repetición de pulsos	10 kHz (~ 0,7 m en el suelo)
Longitud de onda láser	532 nanómetro
Señalar el control	45 m
Señalar el conocimiento	6,5 metros
Precisión de tiempo de vuelo de fotón único	800 ps

Fuente: ICESat-2, NASA (2017) *Requisitos Científicos, Concepto e Implementación*.

El objetivo principal de ATLAS es medir las variaciones que existen en el hielo marino polar y terrestre, sin embargo, su misión recopila datos de elevación de toda la superficie global, por esta razón dispone un número de 20 productos de datos con diferentes enfoques como se muestra en la figura 1, incluyen productos para el hielo terrestre y marino, la atmósfera, la vegetación, la tierra, los océanos y las aguas continentales.

Figura 1. Flujo de trabajo de procesamiento de datos ICESat-2



Fuente: Centro Nacional de Datos de Nieve y Hielo, (2022). *Flujo de trabajo de procesamiento de datos ICESat-2*.

Como se observa en la figura 1, ATL02 contiene los datos registrados como tiempos de vuelo precisos de los fotones, tiempo de llegada de la luz láser que regresa mediante detectores sensibles a un solo fotón (estos registros unidades científicas). El producto de datos ATL03 combina el producto anterior con los datos de actitud y posición del observatorio, con esta información determina la ubicación geodésica (latitud, longitud y altura) para cada uno de fotones (Neumann et al., 2019). El conjunto de datos ATL13 que proporciona alturas de la superficie del agua de cuerpos continentales, se obtiene a partir del producto de datos de fotones geolocalizados a nivel global [ATL03]. (Jasinski, et al., 2020)

4.5.2. Conjunto de datos ATL13 para cuerpos de agua continentales

Uno de los productos de datos generados por medio de las observaciones telemétricas del sensor ATLAS, son los productos ATL13 que presentan los datos de altimetría para la superficie de cuerpos de agua continentales (lagos y reservorios $> 0.1 \text{ km}^2$ / ríos $> \sim 100 \text{ m}$ de largo) en la trayectoria del sensor.

Producto disponible para la mayoría de cuerpos de agua continentales como lagos, ríos, embalses, lagunas, entre otros, lo que proporciona elevaciones como altura ortométrica sobre el nivel medio del mar del modelo gravitacional terrestre 2008 (EGM2008), se deriva de los datos de altura de fotones geolocalizados (producto ATL03) sobre el elipsoide WGS 84 [marco de referencia ITRF2014]. (Jasinski, et al., 2020)

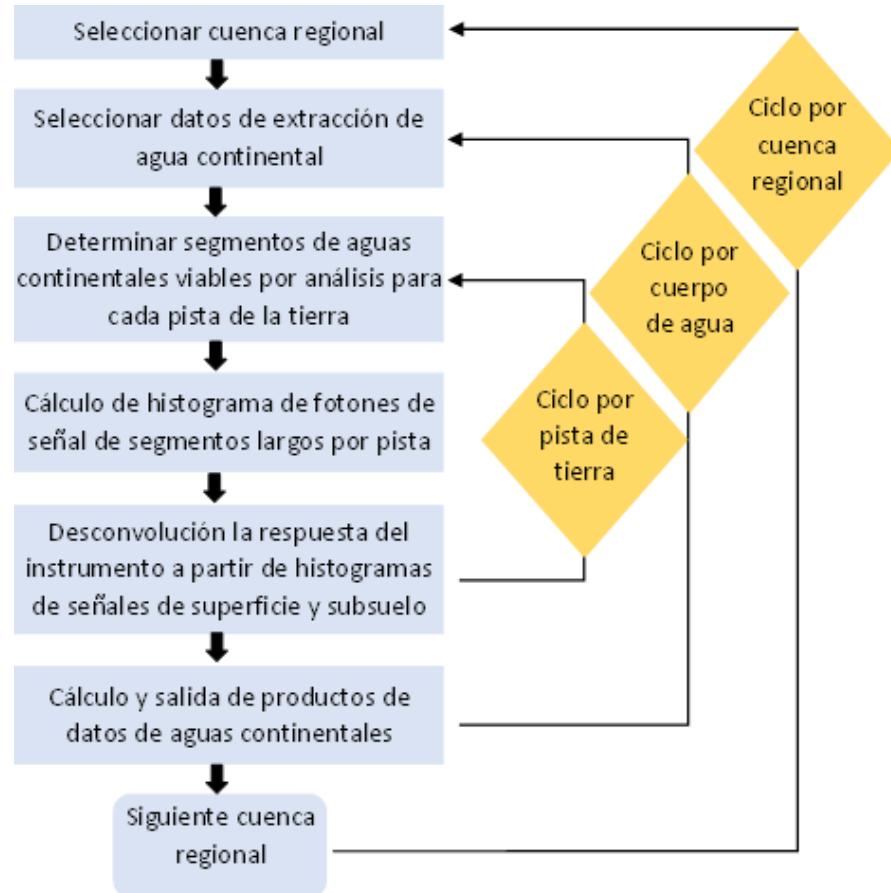
4.5.2.1. Parámetros

Se tiene a disposición la versión número 4 del producto ATL13, la cual contiene el cálculo de alturas para lagos continentales globales con dimensiones mínimas de 0.10 km² incluyen lagos, embalses, bahías, estuarios y ríos, además de una zona de amortiguamiento cercana a la costa de 7 km, esperando que las alturas puedan ser calculadas con un mínimo de distancia de 10 a 100 m entre las huellas de una misma pista, esto dependerá en gran medida de las condiciones atmosféricas y climáticas, lo que permite en el caso particular del lago de Amatitlán, tener una densidad mayor de datos para cada fecha y pista identificada de adquisición de estos datos.

Algoritmo ATL13

Este algoritmo tiene como objetivo determinar la altura ortométrica de cuerpos de agua continentales, el cual utiliza la base de datos de las observaciones de ICESat-2, específicamente los datos que se ubican dentro de los cuerpos de agua continentales de manera global, en la figura 2 se muestra el proceso general de procesamiento. (Jasinski, *et al.*, 2020)

Figura 2. Diagrama de flujo general del algoritmo de altura de aguas continentales para ATL13



Fuente: Jasinski, et al., (2020). *Documento de base teórica de algoritmos (ATBD) para datos de aguas superficiales continentales a lo largo de la trayectoria*, versión 004.

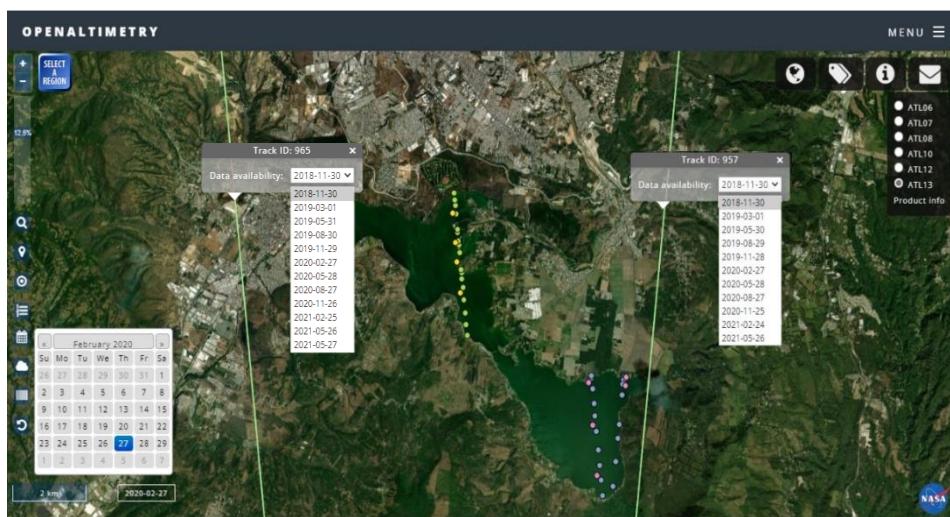
4.5.2.2. Openaltimetry

OpenAltimetry es una plataforma de ciber infraestructura para el descubrimiento, acceso y visualización de datos de las misiones ICESat e ICESat-2 de la NASA. Esta plataforma da acceso a los datos recopilados por el sistema ATLAS a bordo del satélite ICESat-2 y continuamente dispone de esta

información conforme esta tecnología recopila nuevos datos. El servicio web de OpenAltimetry, tiene un gran potencial en el proceso de socialización y distribución de este grupo de datos y otros productos del sistema ATLAS. Proporciona información de una manera práctica, eficiente y gratuita, en formatos compatibles con los Sistemas de Información Geográfica

Se muestra a continuación de manera gráfica, la interfaz del servicio de datos de ICESat y ICESat-2, OpenAltimetry (Figura 3), en donde se identifican las fechas disponibles de datos de las dos pistas que influyen en el área de estudio.

Figura 3. Disponibilidad de datos en la plataforma de OpenAltimetry



Fuente: OpenAltimetry (s.f.) *Disponibilidad de datos en la plataforma de OpenAltimetry*.

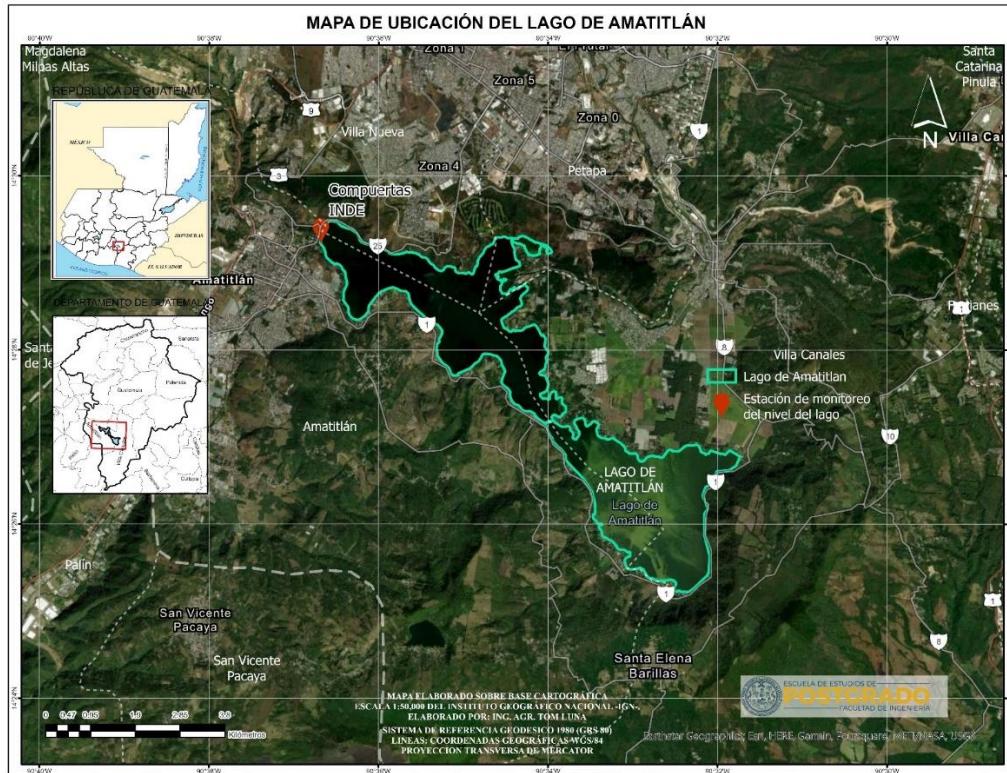
4.6. Entorno de la zona de estudio

Para esta investigación la zona de estudio corresponde a los límites del lago de Amatitlán como se muestra en la figura 4. Cuerpo de agua que recibe el

caudal de los ríos de la cuenca, (principalmente del río Villa Lobos) la cual se extiende con un área de 381.31 km², constituida por el territorio o parte de 14 municipios, que en su mayoría pertenecen al área metropolitana, territorio con mayor concentración de urbanización del departamento de Guatemala y del país, aunque dentro de estos límites también se localizan actividades agrícolas y en un menor espacio áreas de bosque y pasto. Los ríos de la cuenca del lago suman 289 Km de longitud, son el río Villa Lobos el principal río de la cuenca al cual tributan los ríos: Platanitos, Pínula, Las Minas, Tulujá, El Bosque, Molino, San Lucas y Parrameño. La salida del lago es el río Michatoya, el cual tributa a la vertiente del pacífico del país. (AMSA, 2015)

En la figura 4 se muestra el modelo geográfico de la ubicación y delimitación del Lago de Amatitlán, también se identifica la ubicación de la estación limnimétrica ubicada en las compuertas del río Michatoya.

Figura 4. Mapa de ubicación del lago de Amatitlán



Fuente: elaboración propia, utilizando ArcGIS.

4.6.1. Lago de Amatitlán

El lago se localiza a 28 Km de la ciudad capital a una altitud de 1,186 msnm, con una extensión total de 14.75 km² y un volumen aproximado de 282,100,000 m³. Se presenta como dos masas de agua separadas por un canal, ambas partes con características físicas, químicas y biológicas diferentes, la parte noroeste del lago (ver figura 4) es en donde desfogan principalmente todas las aguas residuales de la región metropolitana sur. (AMSA, 2015)

El nivel del agua y otras características del lago, son los factores que determinan sus variaciones a lo largo del tiempo, en donde se identifica inicialmente, la carga de contaminación y explotación del recurso por el crecimiento acelerado de la población circundante, la degradación de los recursos naturales y el suelo, crecimiento del desarrollo comercial e industrial dentro de la cuenca, aumento de las descargas con alta concentración de contaminantes, entre otros. (AMSA, 2015)

4.6.2. Características hidrológicas del lago de Amatitlán

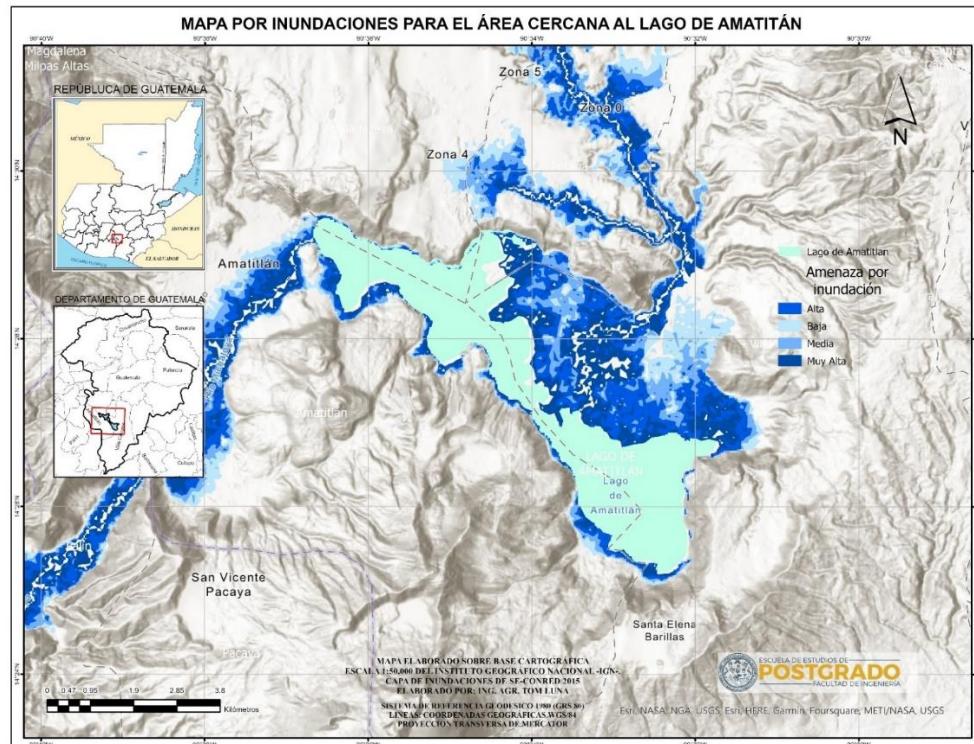
Su recarga la recibe principalmente por la precipitación pluvial, y la colectada por el cauce del río Villa Lobos, el cual concentra todas las descargas de agua residual de la parte sur de la ciudad y poblados dentro de la cuenca, cauce natural proveniente de los manantiales de la cuenca y el agua de escorrentía producto de las lluvias y la impermeabilización del suelo (40 % del total del área), el lago drena su agua hacia la vertiente del pacífico, por medio del río Michatoya. (AMSA, 2015)

Los niveles de agua del lago, como se menciona en el párrafo anterior, dependen de la estación climática en la que se encuentre la región. La cuenca según datos de AMSA, presenta un régimen pluvial anual de 1,250 mm. (AMSA, 2017)

4.7. Acuerdo Gubernativo 179-2001

La declaratoria de sectores de altos riesgos de las cuencas de Amatitlán, Villalobos y Michatoya, emitida por la Junta y secretaría ejecutiva de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED)el 6 de abril de 2001 Acuerdo Gubernativo 179-2001, (2001) establece una zona de amortiguamiento de 100 metros a cada lado del cauce del río, a la cual se añade un área específica que abarca parte de los alrededores del Lago de Amatitlán, específicamente la parte este de dicho cuerpo de agua, que se encuentra dentro de los límites municipales de San Miguel Petapa y Villa Canales. Esta situación se ve claramente reflejada en el mapa de amenazas a inundaciones (figura 5).

Figura 5. Mapa de amenazas por inundaciones



Fuente: CONRED (2015). *Mapa de amenazas por inundaciones*.

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Se presentan a continuación los resultados alcanzados en la determinación del nivel medio del lago de Amatitlán por medio de datos del satélite ICESat-2, para cada una de las unidades de análisis identificadas.

Las unidades de análisis detalladas en el método corresponden a las fechas de adquisición de datos, encontrando ocho momentos en los que el sistema láser ATLAS a bordo de ICESat-2 adquirió datos del lago de Amatitlán y estos fueron procesados por el algoritmo ATL13, los cuales fueron procesados por el algoritmo ATL13 para proporcionar la elevación ortométrica. Para fines de análisis, los datos adquiridos se clasifican en trazas de haz fuerte y trazas de haz débil.

La tabla III muestra las dos órbitas de referencia global utilizadas por el satélite, las cuales pasan por el lago Amatitlán, las órbitas 957 y 965; luego se detallan los datos disponibles para las ocho unidades de análisis, donde los grupos de haces G1, G2 y G3 se dividen en fuertes y débiles; se resume la cantidad de huellas de ambas pistas combinadas (957 y 965) para cada una de las fechas de adquisición de los datos, según la clasificación en grupos y haces.

Tabla III. Número de huellas del grupo ATL13 disponibles para el área del Lago de Amatitlán

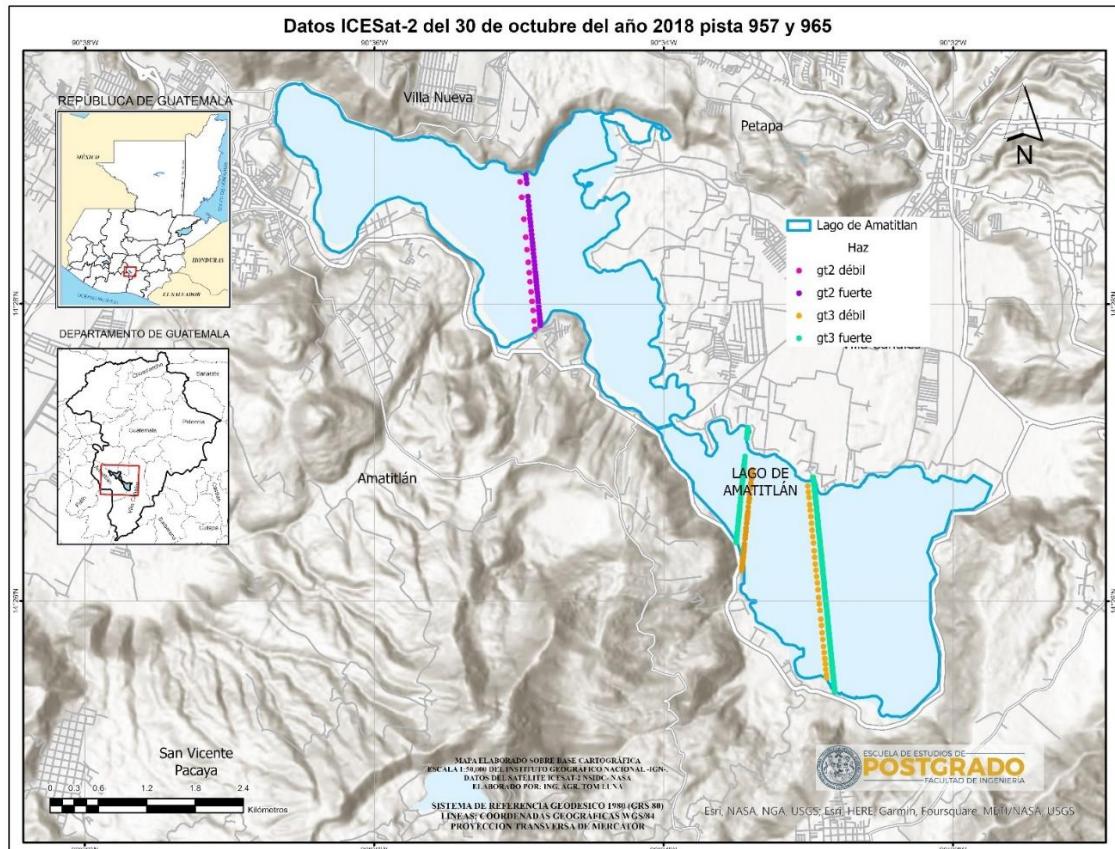
Fecha	Pista 965 / 957					
	Haces débiles			Haces fuertes		
	G1	G2	G3	G1	G2	G3
30-11-2018		13	66		39	191
01-03-2019			18			94
27-02-2020	139	37		35	152	
27-08-2020	1			11		
25-11-2020			52			10
26-11-2020			243			55
24-02-2021	8			29		
26-05-2021			13			46
Total de huellas		572			680	

Fuente: elaboración propia.

Se dispone de 1,252 datos o huellas individuales de alturas ortométricas, 572 para el haz débil y 680 para el haz fuerte, todas localizadas dentro del lago de Amatitlán.

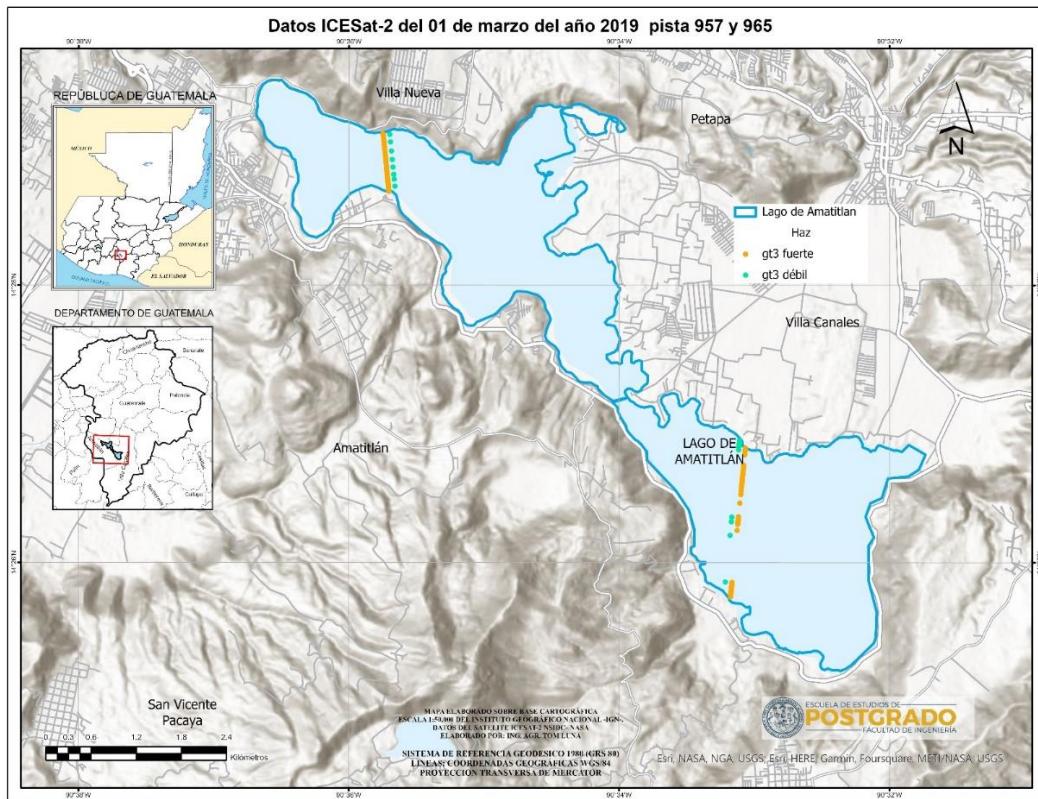
A continuación, de la figura 6 a la 13 se muestran los datos altimétricos obtenidos de ICESat-2 georreferenciados (latitud, longitud y altura) se utilizó el sistema de coordenadas basado en proyección cartográfica Transversal de Mercator adaptada para Guatemala (GTM). En donde se representa geográficamente la disponibilidad de los datos para cada una de las unidades de análisis, las cuales corresponden a las fechas de adquisición y disponibilidad de los datos. Estos se han categorizado según el grupo y el tipo de haz al que representan para cada fecha

Figura 6. Datos ICESat-2 para el 30 de octubre del año 2018 en la pista 957 y 965



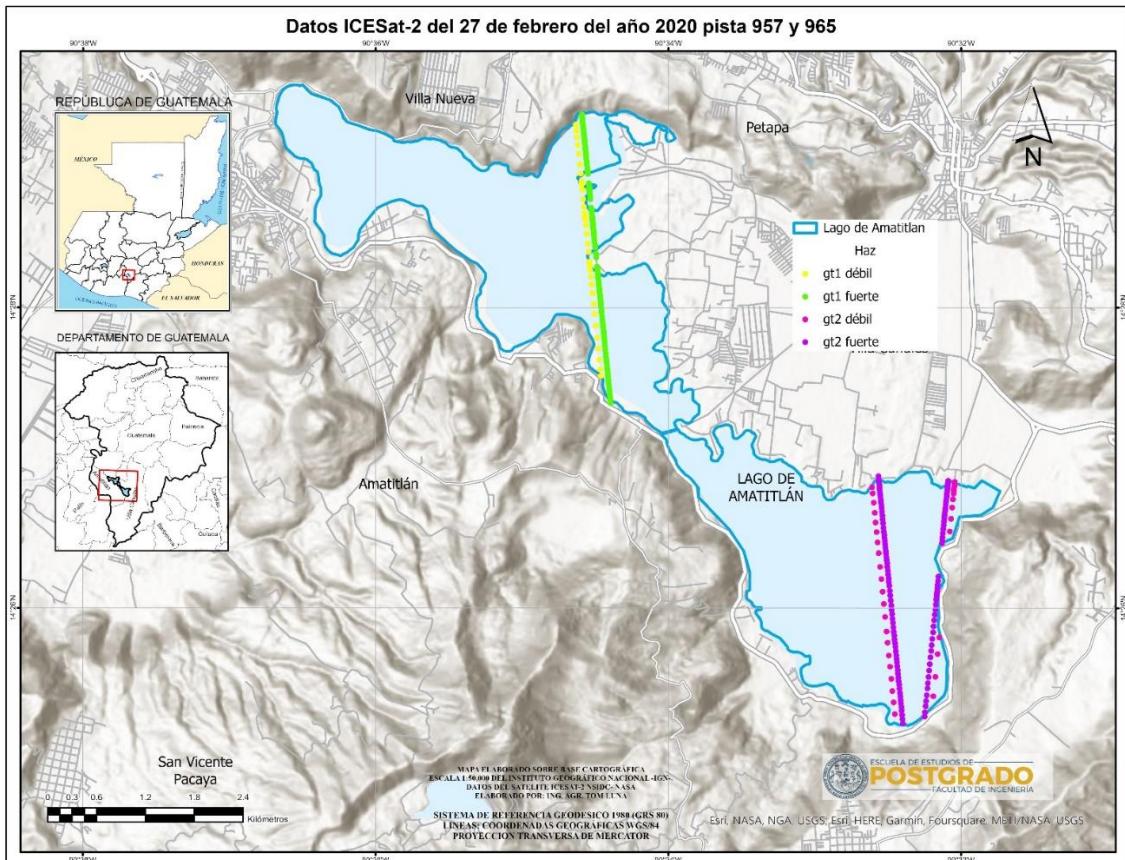
Fuente: elaboración propia, usando ArcGIS.

Figura 7. Datos ICESat-2 para el 01 de marzo del año 2019 en la pista 957 y 965



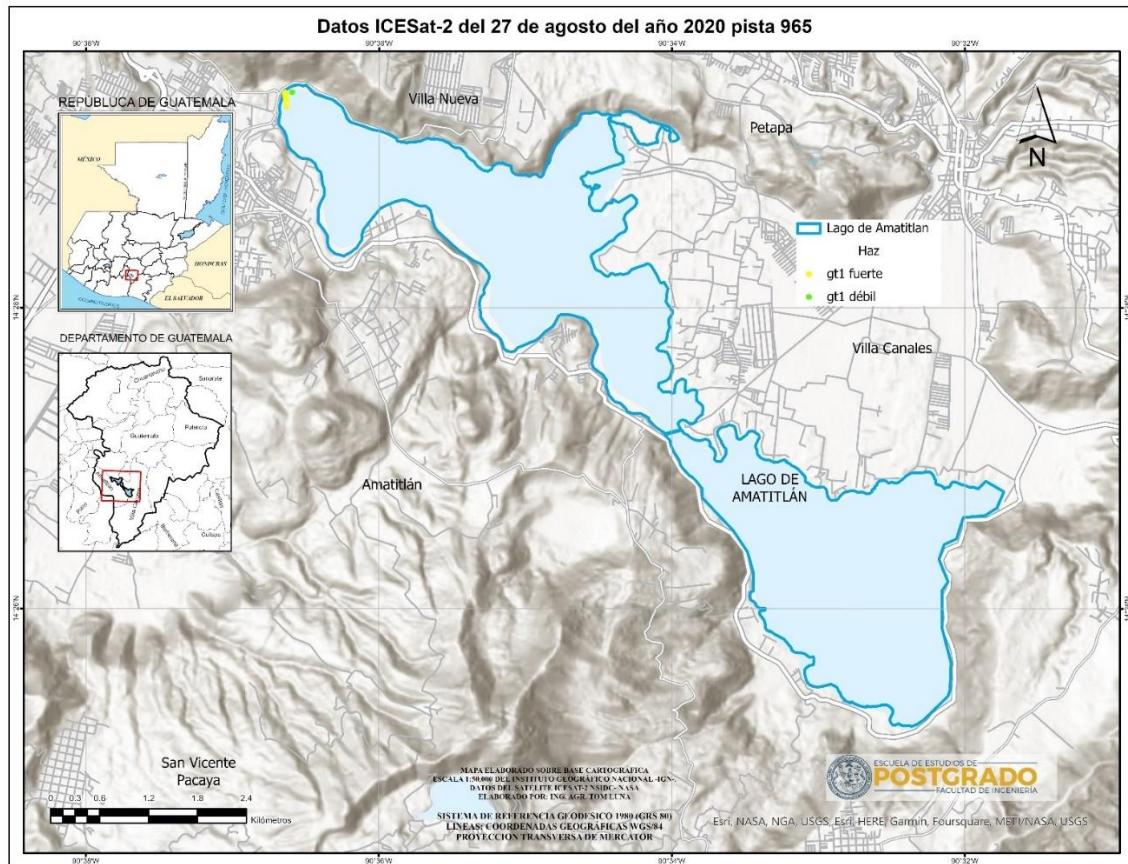
Fuente: elaboración propia, usando ArcGIS.

Figura 8. Datos ICESat-2 para el 27 de febrero del año 2020 en la pista 957 y 965



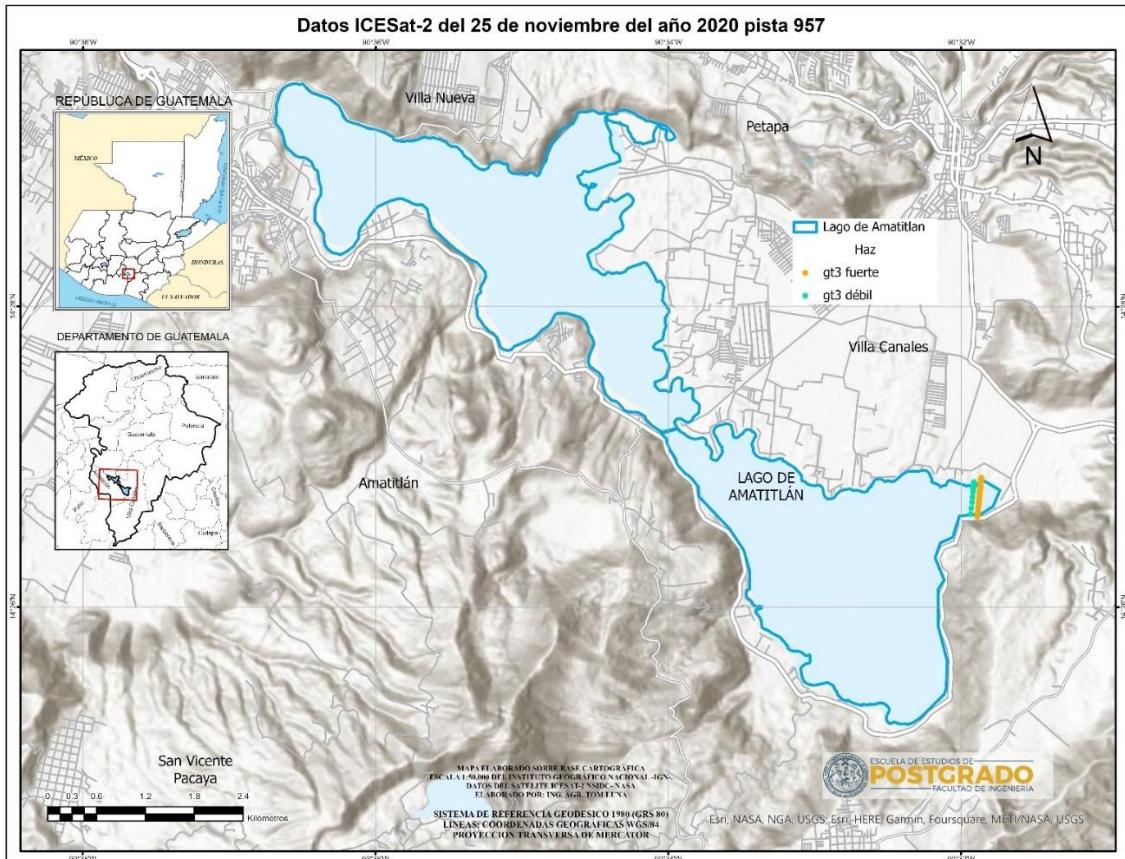
Fuente: elaboración propia, usando ArcGIS.

Figura 9. Datos ICESat-2 para el 27 de agosto del año 2020 en la pista 965



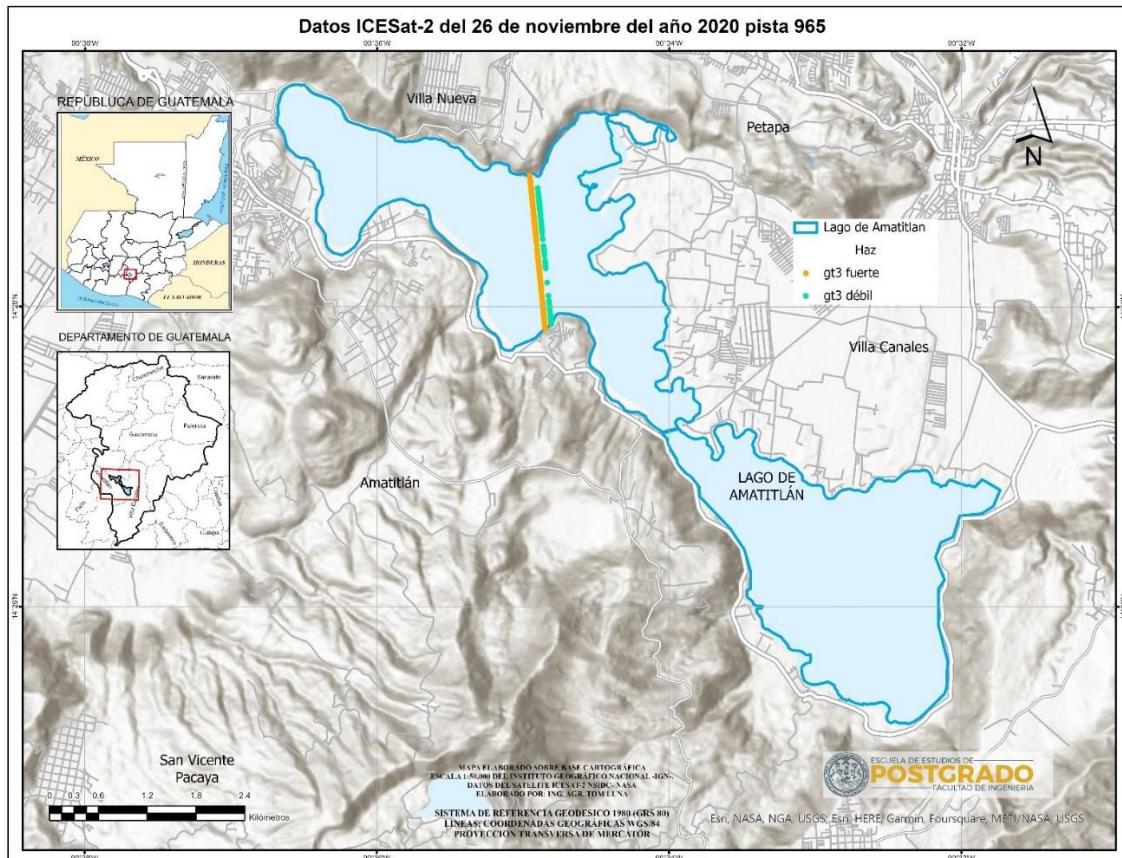
Fuente: elaboración propia, usando ArcGIS.

Figura 10. Datos ICESat-2 para el 25 de noviembre del año 2020 en la pista 957



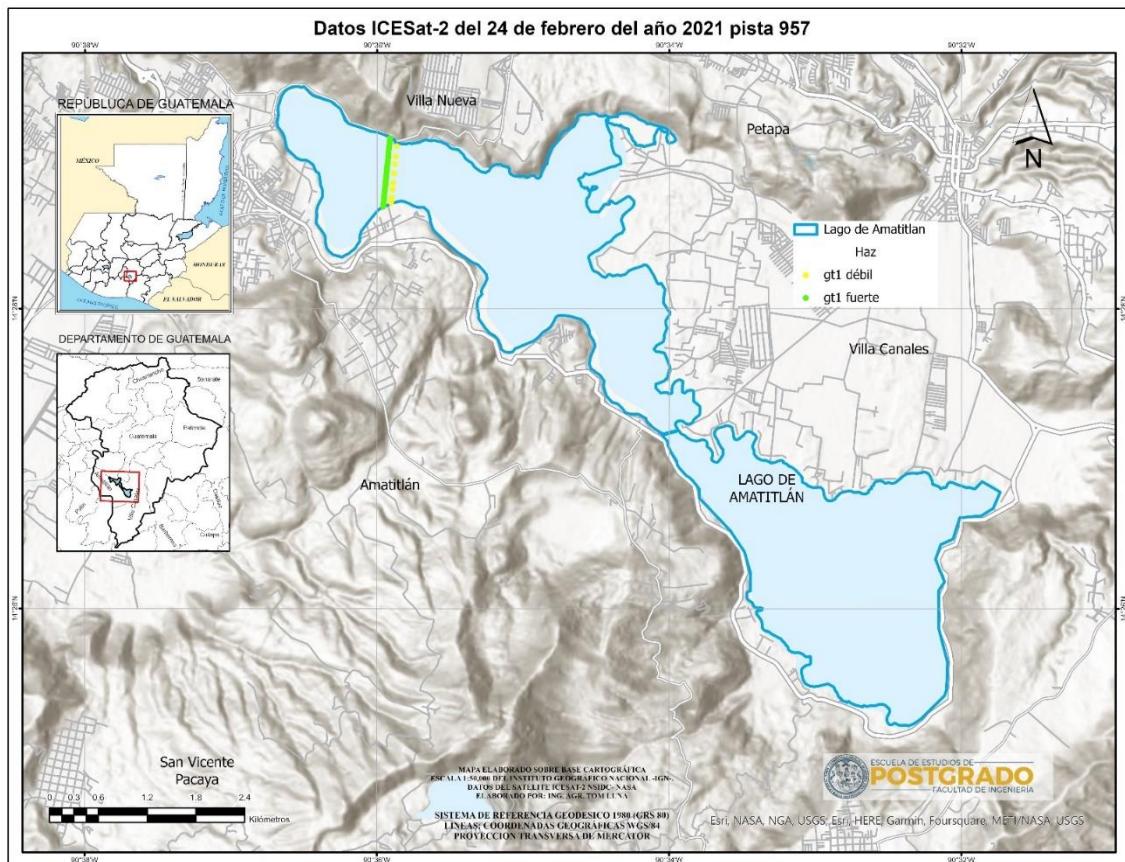
Fuente: elaboración propia, usando ArcGIS.

Figura 11. Datos ICESat-2 para el 26 de noviembre del año 2020 en la pista 965



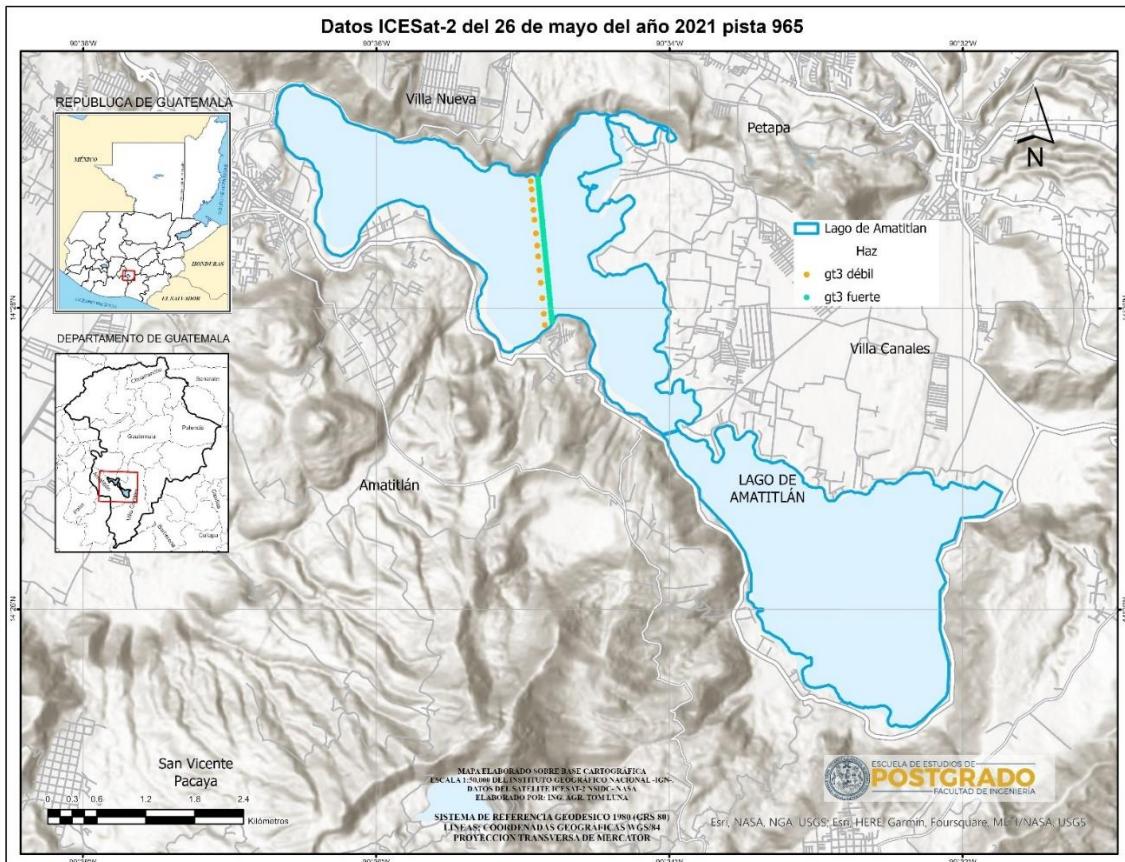
Fuente: elaboración propia, usando ArcGIS.

Figura 12. Datos ICESat-2 para el 24 de febrero del año 2021 en la pista 957



Fuente: elaboración propia, usando ArcGIS.

Figura 13. Datos ICESat-2 para el 26 de mayo del año 2021 en la pista 965



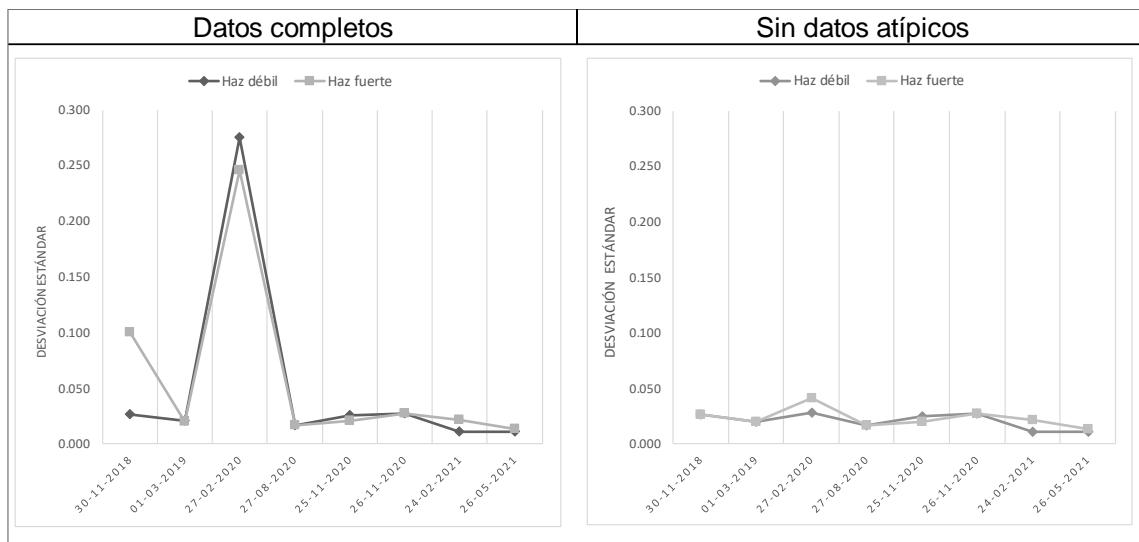
Fuente: elaboración propia, usando ArcGIS.

5.1. Identificación y depuración de datos atípicos

Al utilizar el método de rango intercuartílico se determinaron los valores atípicos mayores y menores dentro de los grupos de datos para cada periodo definido, esto permitió discriminar los datos más dispersos y generar nivel medio del lago con mayor precisión.

Se encontraron inconsistencias entre las lecturas del grupo de datos del 30 de noviembre de 2018 y el 27 de febrero de 2020. Esto se observa claramente en la figura 14, en donde la desviación estándar de los datos cambia considerablemente para las unidades depuradas, lo que genera datos más consistentes.

Figura 14. Depuración de datos atípicos



Fuente: elaboración propia.

La figura 14 representa gráficamente la diferencia entre los datos sin procesar y los datos depurados, en el eje Y se muestra el valor de desviación estándar y en el eje X las unidades de análisis.

5.2. Nivel medio de la superficie del lago de Amatitlán

Con base en los datos obtenidos del producto de datos ATL13, la tabla IV muestra la altura promedio para cada fecha identificada, dividida en haces fuertes y haces débiles. La diferencia máxima entre haces es de 4,5 cm y la mínima de 6 mm.

La altura mayor la encontramos en noviembre del año 2020 con 1,189.109 msnm superando por 1 metro y siete centímetros la altura más baja, en el mes de mayo del año 2021.

Tabla IV. Nivel medio del lago de Amatitlán

Fecha	AML (m)		
	Haz Débil	Haz Fuerte	Diferencia (m)
30/11/2018	1,188.763	1,188.774	0.011
1/03/2019	1,188.558	1,188.541	0.017
27/02/2020	1,188.595	1,188.602	0.007
27/08/2020	1,188.652	1,188.630	0.022
25/11/2020	1,189.101	1,189.107	0.006
26/11/2020	1,189.109	1,189.100	0.009
24/02/2021	1,188.609	1,188.564	0.045
26/05/2021	1,188.038	1,188.064	0.026

Fuente: elaboración propia.

5.3. Precisión del modelo

A continuación, en la tabla V, se presentan los resultados del cálculo de precisión de los datos para cada una de las fechas de adquisición de datos, clasificados en haz fuerte y débil. Esta precisión entre huellas del producto ATL13 para cada unidad de análisis, se determinó por medio de la desviación estándar calculada con anterioridad a partir de los datos depurados, en donde la media de todos los datos, para ambos haces es de 2 cm, el dato menor es de 1.3 cm y el mayor de 4.1 cm.

Tabla V. Precisión de los datos

Fecha	Desviación estándar (m)	
	Haz Débil	Haz Fuerte
30/11/2018	0.027	0.027
1/03/2019	0.020	0.020
27/02/2020	0.028	0.041
27/08/2020	0.016	0.016
25/11/2020	0.025	0.020
26/11/2020	0.027	0.027
24/02/2021	0.011	0.022
26/05/2021	0.011	0.013
media	0.020	0.020

Fuente: elaboración propia.

5.4. Correlación del modelo

A continuación, en la tabla VI, se presenta para cada una de las ocho fechas de adquisición de datos definidas, el nivel medio del lago para ambos haces, posteriormente se muestran los datos de campo obtenidos de la estación limnimétrica del INDE ubicada en las compuertas del lago de Amatitlán para cada unidad de análisis, finalmente se muestran los resultados de la correlación existente entre los datos obtenidos de ICESat-2 y los datos tomados en campo para los ocho fechas de adquisición de datos definidas, clasificados en haz fuerte y débil.

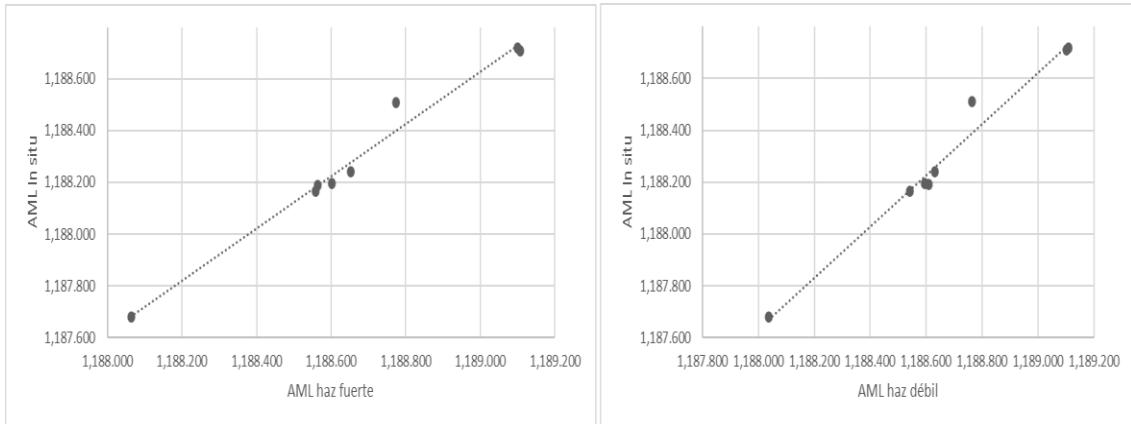
Tabla VI. Nivel medio del lago de Amatitlán y correlación de los datos

Fecha	AML ICESat-2 (msnm)		AML In situ (msnm)	CC	
	Haz Débil	Haz Fuerte		Haz Débil	Haz Fuerte
30/11/2018	1,188.763	1,188.774	1,188.380		
1/03/2019	1,188.558	1,188.541	1,188.160		
27/02/2020	1,188.595	1,188.602	1,188.200		
27/08/2020	1,188.652	1,188.630	1,188.240		
25/11/2020	1,189.101	1,189.107	1,188.720	0.998	0.999
26/11/2020	1,189.109	1,189.100	1,188.720		
24/02/2021	1,188.609	1,188.564	1,188.190		
26/05/2021	1,188.038	1,188.064	1,187.680		

Fuente: elaboración propia.

Para comprender mejor los resultados presentados en la tabla anterior (tabla VI), a continuación, en la figura 15 por medio de diagramas de dispersión se representa la correlación que existe de los datos ICESat-2 y los datos tomados en campo del nivel medio del lago de Amatitlán. Encontrando gráficamente que los datos en campo tienen alta correlación con los obtenidos de las lecturas de ICESat-2 del haz fuerte y débil, la mayor variación se identifica en la fecha de noviembre del año 2018.

Figura 15. Diagramas de dispersión de los datos ICESat-2 y datos en campo



Fuente: elaboración propia.

5.5. Exactitud del modelo

A continuación, en la tabla 7 se muestran las ocho unidades identificadas y para cada una de ellas, se presenta la diferencia existente de los datos obtenidos del satélite láser ICESat-2 y los datos obtenidos en campo, esto para el haz débil y fuerte, finalmente el cálculo del error medio cuadrático entre los datos obtenidos con ambos métodos. En la tabla se resalta la diferencia máxima de los niveles para las ocho fechas en el haz débil y el haz fuerte, 42 cm y 41 cm respectivamente y los valores medios para estas unidades de análisis del RSME de 38 cm y 37 cm.

Tabla VII. Cálculo de exactitud de los datos

Fecha	Diferencia datos in situ		RSME (m)	
	Haz Débil	Haz Fuerte	Haz Débil	Haz Fuerte
30/11/2018	0.25	0.26		
1/03/2019	0.39	0.38		
27/02/2020	0.40	0.41		
27/08/2020	0.41	0.39		
25/11/2020	0.39	0.40	0.380	0.374
26/11/2020	0.39	0.38		
24/02/2021	0.42	0.37		
26/05/2021	0.36	0.38		

Fuente: elaboración propia.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El área del lago de Amatitlán tiene la dimensión suficiente para poder monitorear sus niveles superficiales con tecnología láser satelital (ICESat-2), utilizando los productos del grupo de datos ATL13 en su versión 4. Para este cuerpo de agua continental, trascurren dos pistas del satélite ICESat-2 (957 y 965) y se dispone ocho fechas de adquisición de datos, de noviembre del año 2018 a mayo de 2021.

Con los resultados obtenidos al utilizar la tecnología satelital láser, se identifica un aumento considerable en el nivel lago en el mes de noviembre del 2020 para ambos haces (1,189.11 aproximadamente), respecto a las otras fechas de adquisición de datos en el lago de Amatitlán, sin embargo, el nivel del agua para el año 2021 baja aproximadamente un metro (1,188.04 aproximadamente), en el mes de mayo.

Estos resultados del nivel del lago obtenidos para cada fecha de observación se calcularon al promediar los datos de elevación a lo largo de cada trayectoria, se excluyeron previamente los datos atípicos. La precisión de los datos en cada periodo se determinó con el cálculo de la media de la desviación estándar en cada trayectoria. (Yuan, 2020) Se encontró un valor máximo y mínimo de 2.8 cm y 1.1 cm, en el haz débil, y un valor máximo y mínimo de 4.1 cm y 1.3 cm, en el haz fuerte. Identificando que, para el haz débil, existe ligeramente una menor variación entre los datos de cada trayectoria, sin embargo, al calcular la media de la diferencia de las ocho fechas como se muestra en la tabla 5, el resultado es igual para ambos haces (2 cm).

Además de conocer la incertidumbre entre las lecturas de cada una de las ocho fechas de adquisición de datos, obtenidos del altímetro, para evaluar y validar los datos obtenidos de ICESat-2, se calculó la correlación y exactitud; por lo que fue necesario contar con datos obtenidos en campo, en este caso se utilizaron los registros del nivel del lago que levanta la estación del INDE ubicada en las compuertas del lago de Amatitlán

De manera gráfica en la figura 15, se muestran la distribución de los datos para ambas metodologías, demostrando claramente que existe alta tendencia y relación, entre ambas metodologías, una utilizó datos del altímetro láser ICESat-2 y la otra una estación que registra el nivel del lago en campo. Esto favorece la hipótesis de este estudio, lo que validó los resultados obtenidos con tecnología satelital láser.

La comparación de los datos del modelo innovador en relación con los datos levantados en campo (tabla 6), demuestra, un valor de correlación cercano a 1 (0.99) tanto para el haz fuerte como para el débil, siendo el resultado una correlación positiva de los datos. En otras palabras, los niveles altimétricos de ICESat-2 son consistentes con los registros obtenidos en campo; al existir un cambio en el nivel del lago, sea aumento o disminución de la altura del agua, esta condición es reflejada con datos del producto ATL13 de ICESat-2, ya que tiene concordancia con los datos en campo utilizados para la evaluación.

En la tabla VII se muestra la diferencia máxima que existe entre los datos obtenidos con tecnología satelital láser y los datos registrados en campo, obteniendo una diferencia menor a 42 cm en ambos haces para el lago de Amatitlán. Estudios como el desarrollado por Yuan (2020) en donde se analizaron varios cuerpos de agua, muestra en promedio que la diferencia es de 6 centímetros, sin embargo dentro de los 30 cuerpos de agua analizados en ese

estudio, cinco presentaban datos de 10 a 50 cm de diferencia, basándonos en esta referencia, el lago de Amatitlán presenta una diferencia moderada entre los niveles obtenidos con ambas metodologías.

A través del cálculo de error cuadrático medio (RMSE), se determinó la incertidumbre máxima del nivel que existe en los datos del modelo innovador, respecto a los datos de referencia tomados en campo, el cual en promedio no supera los 38 cm en el haz fuerte y débil, como se muestra en la tabla 7. Dandabathula (2020) que evaluó 15 cuerpos de agua, presenta resultados muy similares, sin embargo, en ese estudio los resultados obtenidos del RMSE para el haz fuerte presenta mayor exactitud; esto no se evidencia en el caso del Lago de Amatitlán ya que el valor del promedio de error en el haz débil y el haz fuerte (tabla 7) no varía significativamente (< 0.005 m).

Los resultados obtenidos de esta evaluación, en cuanto al monitoreo del nivel del lago de Amatitlán se utilizó el método innovador que se propone basado en datos de ICESat-2, demuestran que para este cuerpo de agua continental no existe mayor diferencia entre el haz fuerte y el débil del sistema altimétrico (ATLAS) de este satélite, y que el error de los datos resultantes de este nuevo método, respecto a los registros en campo, es en gran medida constante en las ocho fechas de adquisición de datos.

CONCLUSIONES

1. Se presenta una nueva base de datos y su respectiva evaluación, como resultado de la aplicación de altimetría láser del satélite ICESat-2 para la determinación periódica del nivel del agua del lago de Amatitlán en ocho fechas de adquisición de datos del año 2028 al 2021. Esta información obtenida por medio de teledetección sobre las variaciones de la altura media del lago, será de utilidad para las instituciones responsables de la toma de decisiones.
2. El nivel medio del lago de Amatitlán, obtenido con el método innovador para cada una de las ocho fechas identificadas, se utilizaron los datos de ICESat-2 de alturas ortométricas de cuerpos de agua continentales (grupo de datos ATL13), se encuentra entre 1,188.04 a los 1,189.11 msnm.
3. La desviación estándar máxima entre las lecturas de cada una de las trayectorias de 2.8 y 4.1 centímetros para el haz débil y fuerte respectivamente, evidenciando una precisión alta de los datos, que no varía significativamente entre ambos haces.
4. Se determinó la correlación de los datos de ICESat-2 respecto a los datos registrados en campo en el lago de Amatitlán, la cuál es de 0.989 y 0.999 para el haz débil y el haz fuerte respectivamente. Además, se obtuvo la exactitud del modelo por medio del cálculo del error cuadrático medio en los niveles del lago determinados con este método propuesto, se obtuvieron valores de 38 y 37 centímetros para el haz débil y el haz fuerte

respectivamente. El error es constante en las ocho fechas de adquisición de datos, es por ello que existe un alto grado de correlación.

RECOMENDACIONES

1. Replicar y evaluar esta metodología en otros lagos y embalses del territorio de Guatemala para generar una base de datos a nivel de país, esperando que los resultados confirmen los hallazgos de este estudio.
2. Analizar con mayor detenimiento los resultados presentados en este estudio sobre el nivel medio del Lago de Amatitlán.
3. Tomar en cuenta la metodología utilizada en este estudio para determinar la precisión del modelo, puede ser aplicada en estudiar cuerpos de agua que no tienen registros en campo.
4. Trabajar en mejorar el modelo metodológico utilizado en este estudio para determinar con mayor exactitud los niveles de los cuerpos de agua continentales de la región.

REFERENCIAS

1. Acuerdo Gubernativo 179-2001. Declaratoria de sectores de altos riesgos de las cuencas de Amatitlán, Villalobos y Michatoya. Diario Oficial de la República de Guatemala. Guatemala, 6 de abril de 2001.
2. Birkett, CM (octubre 1995). La contribución de TOPEX/POSEIDON al monitoreo global de lagos climáticamente sensibles. *Revista de Investigación Geofísica: Océanos*. 100 (C12), 25179-25204.
3. Creteaux, JF y Birkett, C. (febrero 2006). Estudios de lagos a partir de altimetría radar satelital. *Comptes Rendus Geoscience*. 338 (14-15), 1098-1112.
4. EARTH DATA NASA. (s.f.). *National Snow & Ice Data Center*. NSIDC. Recuperado de <https://nsidc.org/data/icesat>
5. Giribabu D., Sitiraju S. (2020). Validación del producto de nivel de agua superficial ICESat-2 ATL13 con datos de medidores en tiempo casi real, hidrología. *Science PG*. 8, (2), 2020, 19-25. Recuperado de doi: 10.11648/j.hyd.20200802.11
6. Markus, T., Neumann, T., Martino, A., Abdalati, W., Brunt, K., Csatho, B., ... y Zwally, J. (junio 2017). El satélite de elevación de hielo, nubes y tierra-2 (ICESat-2): requisitos científicos, concepto e implementación. *Detección remota del medio ambiente*, (190) 260-273.

7. Medina Mazariegos, C. E. (2009). *Modelos numéricos y teledetección en el lago de Izabal, Guatemala*. (Tesis doctoral). Universidad de Cádiz. España.
8. OpenAltimetry (s.f.) Servicios avanzados de descubrimiento, procesamiento y visualización para datos de altímetro ICESat e ICESat-2. OpenAltimetry. Recuperado de <https://openaltimetry.org/>.
9. Schwatke, C., Dettmering, D., Bosch, W. y Seitz, F. (agosto 2015). DAHITI: un enfoque innovador para estimar series temporales de niveles de agua en aguas continentales utilizando altimetria satelital multimisión. *Hidrología y Ciencias del Sistema Terrestre*. 19 (10), 4345-4364.
10. Xu, N., Ma, Y., Zhang, W. y Wang, X. H. (julio 2020). Cambios en el nivel del agua superficial durante 2003–2019 en Australia revelados por altimetria ICESat/ICESat-2 e imágenes Landsat. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 18(7), 1129-1133.
11. Yuan, C., Gong, P. y Bai, Y. (diciembre 2020). Evaluación del rendimiento de los datos del altímetro láser ICESat-2 para la medición del nivel del agua en lagos y embalses en China. *Percepción remota*, 12 (5), 770.
12. Zyskind, G. y Nathan, O. (2015, mayo). Descentralización de la privacidad: uso de blockchain para proteger los datos personales. Madrid, España: Real Instituto ELCANO.

ANEXOS

Anexo 1. **Fotografía de las compuertas del lago de Amatitlán**



Fuente: Comisión Nacional de Energía Eléctrica de Guatemala (2012). *Compuertas del lago de Amatitlán.*