



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Medición de Fluorescencia emitida por
Fitoplancton en el Golfo de México**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecatrónico

P R E S E N T A

Evelio Joaquin Espinoza

DIRECTOR DE TESIS

M. en C. Arturo Ronquillo Arvizu



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

Agradecimientos

Mi agradecimiento al Instituto de Ciencias del mar y Limnología, UNAM, el cual me brindó la oportunidad de formar parte de la investigación "Caracterización Ecológica de la zona Suroeste del Mar Profundo del Golfo de México", dentro en la Campaña Oceanográfica SOGOM 04 (Suroeste del Golfo de México), no hubiese podido arribar a la investigación sin la ayuda del Dr. Adolfo Gracia Gasca, ICML-UNAM. También quiero agradecer a la Sección Fitoplancton y Producción Primaria, en especial a M. en C. Ruth Luna Soria por brindarme todos los recursos y herramientas necesarios para llevar a cabo el proceso de investigación. Así mismo, deseo expresar mi reconocimiento y agradecer a mi director de tesis M. en C. Arturo Ronquillo Arvizu quien con sus conocimientos y apoyo me guió a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados que buscaba.

A mí Facultad de Ingeniería y docentes por su sabiduría, conocimiento, apoyo y por su tiempo gracias.

Resumen

Debido a derrames de petróleo que han ocurrido en el golfo de México, como el ocurrido el 1 de diciembre de 1978 en la perforación del pozo Ixtoc-I al más reciente derrame en la plataforma Deepwater Horizon que comenzó el 20 de abril de 2010, se presentan contaminantes que afectan al medio ambiente, debido a esto se ha buscado caracterizar el Golfo de México de forma física, química y biológica para establecer el estado y variabilidad natural actual [1].

Un microorganismo clave de los ecosistemas oceánicos, fundamental en la cadena alimentaria marina y de la vida en este planeta es el fitoplancton, aprender su comportamiento frente a los contaminantes es de suma importancia, siendo a través de la medición de la fluorescencia emitida por clorofila a el método no destructivo más eficiente para conocer la concentración superficial de fitoplancton.

El presente trabajo tuvo como objetivo adquirir datos de fluorescencia superficial emitida por el microorganismo fitoplancton en 63 estaciones y en los transectos de la campaña Oceanográfica SOGOM 04 (Suroeste del Golfo de México 04) con el fluorómetro modelo 10-AU marca Turner Desings, para lograr este objetivo en primer lugar, se desarrolló un software con lenguaje G (LabView) para adquirir datos del fluorómetro de registro continuo, GPS y Termosalinómetro, en segundo lugar, se desarrolló un software con lenguaje G (LabView) para filtrar y concatenar los datos en una base de datos, finalmente, con los resultados obtenidos se elaboraron mapas que ayudarán a determinar el comportamiento de la fluorescencia de la clorofila a, la cual tiene una relación lineal con la concentración de fitoplancton.

Dada la importancia Ecológica de caracterizar la Zona Suroeste del Golfo de México, consideramos que los resultados obtenidos en esta tesis presenta una contribución tecnológica al estudio medioambiental, permitiendo conocer la concentración de fluorescencia de la clorofila a y el comportamiento del fitoplancton ante hidrocarburos y otros contaminantes.

Presenta: JOAQUIN ESPINOZA EVELIO
Tutor: M. EN C. RONQUILLO ARVIZU ARTURO

Índice general

Índice de figuras	5
1. Introducción	8
2. Objetivo	10
3. Antecedentes	11
4. Marco teórico	13
4.1. Planteamiento del problema	13
4.2. Conceptos de Física y Química	15
4.2.1. Fotosíntesis	15
4.2.2. Clorofila - a	17
4.2.3. Radiación Electromagnética	18
4.3. Luminiscencia	20
4.4. Variables que afectan la Fluorescencia	21
4.5. Ley de Lambert y Beer	23
5. Instrumentación	26
5.1. Fluorómetro Marca Turner Designs Modelo 10AU-005-CE Serie 1100332	26
5.1.1. Fluorómetro: Principio de Operación	27
5.1.2. Configuración del instrumento	29
5.1.3. Estructura de datos de fluorescencia	31
5.2. GPS	31
5.2.1. Estructura de Datos de GPS	32
5.3. Termosalinómetro SBE 45 Micro TSG	33
6. Metodología	35
6.1. Proceso de adquisición de datos	35

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	5
6.1.1. Adquisición de datos del FLUORÓMETRO DE REGISTRO CONTINUO MODELO 10-AU Marca TURNER DESINGS	37
6.1.2. Datos Crudos	43
6.2. Procesamiento de Datos	44
6.2.1. Formato de Datos para software Ocean Data View (ODV).	46
6.3. Ocean Data View (ODV)	47
6.3.1. Mapa de referencia para el análisis	48
7. Resultados	50
7.0.1. Fluorescencia superficial SOGOM 4	50
8. Conclusiones	54
Apéndice	56
A. Mapas SOGOM 4	57

Índice de figuras

4.1. Fotofosforilación	16
4.2. Espectros de absorción de los pigmentos clorofila a, clorofila b y b-caroteno	17
4.3. molécula de clorofila a	18
4.4. Propiedades de onda	18
4.5. Espectro electromagnético	19
4.6. Espectros de absorción y emisión de fluorescencia de un com- puesto etilénico.	21
4.7. Diagrama esquemático de un experimento espectrofotométrico de haz simple	23
5.1. 10AU Field and Laboratory Fluorometer [59]	27
5.2. Sistema Óptico del modelo 10AU [59]	28
5.3. Fuente de luz modelo 10-045	29
5.4. Diagrama: Filtro de Referencia modelo 10-032 Cuadrado 1 ND	30
5.5. Filtro de excitación modelo 10-050R	30
5.6. Filtros de emisió modelo 10-051R	30
5.7. SBE 45 Micro TSG (Termosalinómetro)	34
6.1. Área de estudio: Golfo de México	36
6.2. Segundo Laboratorio General del B/O JUSTO SIERRA	36
6.3. Dispositivo traductor de señales RS-232	37
6.4. Diagrama de Flujo del programa de Adquisición de Datos	39
6.5. Captura de pantalla de las instrucciones	40
6.6. Índice del Programa FLUOROMETRO SOGOM4-1	41
6.7. Índice del Programa FLUOROMETRO SOGOM4-1	42
6.8. Captura de pantalla de índice General	43
6.9. Captura de pantalla Datos SOGOM 4 RAW	44
6.10. Diagrama de Flujo	45
6.11. Diagrama de procesamiento de datos	46
6.12. Formato de datos para el programa ODV	46

6.13. Base De Datos Excel SOGOM4	47
6.14. CIGoM, CICESE, Mapa de concentración de clorofila a superficial en el Golfo de México	49
7.1. Mapa de concentración de fluorescencia emitida por clorofila a superficial en el Golfo de México SOGOM-04	51
7.2. Mapa de concentración de salinidad superficial en el Golfo de México SOGOM-04	52
A.1. SOGOM 4 Mapa e histograma de Fluorescencia y Salinidad (Estaciones y Transitos)	57
A.2. SOGOM 4 Mapa e histograma de Temperatura de Instrumentos (Estaciones y Transitos)	58
A.3. SOGOM 4 Mapa e histograma de Fluorescencia y Salinidad (Estaciones de Día)	59
A.4. SOGOM 4 Mapa e histograma de Temperatura de Instrumentos (Estaciones de Día)	60
A.5. SOGOM 4 Mapa e histograma de Fluorescencia y Salinidad (Transito de Día)	61
A.6. SOGOM 4 Mapa e histograma de Temperatura de Instrumentos (Transito de Día)	62
A.7. SOGOM 4 Mapa e histograma de Fluorescencia y Salinidad (Estaciones de Noche)	63
A.8. SOGOM 4 Mapa e histograma de Temperatura de Instrumentos (Estaciones de Noche)	64
A.9. SOGOM 4 Mapa e histograma de Fluorescencia y Salinidad (Transito de Noche)	65
A.10. SOGOM 4 Mapa e histograma de Temperatura de Instrumentos (Transito de Noche)	66

Capítulo 1

Introducción

El Golfo de México es una de las regiones de petróleo y gas más ricas y productivas del mundo [2]. Debido a la actividad de la industria petrolera como extracción en la zona y a derrames gigantescos de petróleo que han ocurrido a lo largo de este siglo se presentan diferentes grados de contaminación que podría causar daños fisiológicos a la vida marina; los hidrocarburos son uno de los principales contaminantes en los mares y litorales [3] afectando el funcionamiento de importantes ecosistemas como los corales, manglares, humedales y pastos marinos.

Debido a los daños ecológicos y económicos en México el Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM) tiene como objetivo hacer mediciones físicas, químicas y biológicas para establecer una línea base del estado actual y variabilidad natural del ecosistema del Golfo de México; y así estudiar los efectos de los hidrocarburos y otros contaminantes en el ecosistema marino mediante la caracterización biológica [4]. Entre los microorganismos de interés se encuentra el fitoplancton, base principal de las redes tróficas; es decir que constituye la base de la pirámide alimenticia de todo el ecosistema marino debido a que produce su propio alimento y nutrientes por medio del proceso de fotosíntesis. En los sistemas acuáticos la biomasa del fitoplancton es una propiedad ecológica clave, y es necesario cuantificar al fitoplancton que es componente del ecosistema pelágico primordialmente responsable de la transformación del dióxido de carbono en carbono orgánico [5]; por tanto, es indispensable conocer cómo es afectado por los hidrocarburos. Entiéndase al ecosistema pelágico como el dominio formado por las aguas libres que no están en contacto con el fondo [6]. El fitoplancton está compuesto por pequeñas algas procariotas o eucariotas que poseen clorofila y otros pigmentos fotoluminiscentes similares a los de las plantas terrestres. La espectrometría de fluorescencia o espectrofluorimetría es el método espectroscópico óptico más extensivamente usado en mediciones analíticas y en investigación cien-

tífica para medir la concentración del fitoplancton [7], se fundamenta en el proceso de transferencia de electrones durante la fotosíntesis.

Este trabajo presenta Mapas de distribución del fitoplancton en el Golfo de México, como parámetro indicador se utilizó la clorofila a basado en la emisión fluorescente registrada en 63 estaciones y transectos durante la investigación.

Capítulo 2

Objetivo

Objetivo general

Adquirir datos de fluorescencia en 63 estaciones y en el transecto de estas en el golfo de México, con un fluorómetro modelo 10-AU marca Turner Desings.

Objetivos Específicos

- Desarrollar software con lenguaje G (LabView) para adquirir datos del fluorómetro de registro continuo modelo 10 AU, GPS y Termosalinómetro.
- Desarrollar software con lenguaje G (LabView) para procesar datos del fluorómetro de registro continuo modelo 10 AU, GPS y Termosalinómetro.

Capítulo 3

Antecedentes

Un microorganismo autótrofo base de los ecosistemas acuáticos es el fitoplancton es el responsable de la producción de un poco más del 50 % del oxígeno en nuestro mundo [8], es de suma importancia conocer el comportamiento de este microorganismo ante los hidrocarburos. A pesar de la importancia del fitoplancton marino los patrones globales de diversidad siguen estando mal caracterizados. Un estudio reciente sobre la riqueza de fitoplancton marino está en desacuerdo con la predicción de la teoría metabólica [9], la cual explica que la temperatura ejerce un control clave sobre las tasas metabólicas y, por lo tanto, promueve la especialización y el aumento de la riqueza de especies en áreas tropicales cálidas a lo largo del tiempo [10].

La diversidad de especies de fitoplancton en aguas abiertas pueden originarse a partir de otros factores como lo es la complejidad del comportamiento ecológico [11] ya que dentro de los fenómenos más importantes en el flujo energético de los ecosistemas acuáticos están la cantidad y variación de los nutrientes responsables en primera instancia de la productividad primaria acuática, por tanto la biodiversidad de la comunidad de fitoplancton depende de su distribución espacial y temporal en relación con las condiciones ambientales, así como su composición [12].

En México existen mayor literatura disponible para aguas del Pacífico mexicano, existiendo pocas obras recientes sobre grupos taxonómicos del fitoplancton en la porción sur del golfo de México, un estudio que pretende actualizar la información sobre la biodiversidad de microalgas y protistas del fitoplancton marino en aguas del Golfo de México, fue llevado a cabo por Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, titulado; Biodiversidad de algas planctónicas marinas (Cyanobacteria, Prasinophyceae, Euglenophyta, Chrysophyceae, Dictyochophyceae,

Eustigmatophyceae, Parmophyceae, Raphidophyceae, Bacillariophyta, Cryptophyta, Haptophyta, Dinoflagellata) en México, donde se menciona que se siguen anotando y describiendo nuevas especies en el fitoplancton de aguas mexicanas [13]. Con el cambio climático se puede presentar un incremento de especies productoras de toxinas y la llegada de especies invasoras los cuales deberían ser estudiados con protocolos especializados. Una investigación de tesis que explora la importancia de estudiar y conocer qué microalgas producen toxinas y su impacto negativo lleva por nombre: "PATRONES DE DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DEL FITOPLANCTON NOCIVO EN LA ZONA COSTERA DE TUXPAN, VERACRUZ; MÉXICO", llevada a cabo por C. Biol. Rosa Estela Orduña Medrano, menciona que en la zona costera de Tuxpan Veracruz se reportaron 265 especies de fitoplancton nocivo. Debido a la abundancia de fitoplancton nocivo y el desconocimiento de la diversidad taxonómica, urge la necesidad de crear herramientas para la monitorización de ecosistemas costeros, sobre todo en zona costeras donde se cuenta con importantes Patrones de Distribución y Abundancia del fitoplancton, de esta manera establecer con tiempo las medidas preventivas y adecuadas ante especies que afecten la diversidad nativa de la zona [14].

Una de las técnicas más comunes para cuantificar la biomasa de organismos fitoplanctónicos es la determinación de la clorofila en el agua. La cuantificación de la clorofila sigue siendo un método aceptado internacionalmente para conocer la cantidad total de biomasa presente en un momento dado y en una determinada cantidad de agua, la presencia de clorofila en el agua es una respuesta casi inmediata a la variabilidad de los nutrimentos, lo cual propicia que su cuantificación y seguimiento sean indicadores confiables de las variaciones de la biomasa de organismos fitoplanctónicos [15].

Capítulo 4

Marco teórico

4.1. Planteamiento del problema

Desde el año 2004, entre 300 y 700 barriles de petróleo han sido derramados cada día en el océano desde la planta petrolera propiedad de la compañía Taylor Energy, en la costa de Luisiana, que se hundió a raíz del huracán Iván [16]. Así mismo el 20 de abril de 2010 la plataforma petrolera Deepwater Horizon, perteneciente a la compañía British Petroleum explotó en aguas del Golfo de México y entre los daños provocados se cuenta el hundimiento de la plataforma y el derrame de petróleo. Durante los 87 días posteriores de la explosión se vertieron un total de 780 millones de litros de crudo, esto afectó 1.773 kilómetros de costa en Estados Unidos, y se cree que unos 37 millones de litros permanecen en el sedimento del fondo del Golfo de México, lo que podría causar graves daños fisiológicos a la vida marina [17].

Después del derrame de la plataforma petrolífera Deepwater Horizon iniciaron exploraciones con la finalidad de estudiar patrones de especies dominantes, diferencias en la abundancia y en las tallas, a cargo del consorcio C-IMAGE bajo el liderazgo de la Universidad del Sur de Florida (USF), con la colaboración de la Texas A&M University-Corpus Christi, la Universidad de la Habana y el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICML) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Tras siete años en el estudio del impacto ecológico en las aguas costeras de México, EU y Cuba en el Golfo de México los científicos reportaron resultados favorables en la recuperación de este ecosistema oceánico comprobando la resiliencia de las poblaciones de peces. Un trabajo publicado en la revista “Journal of Marine and Coastal Fisheries”, Adolfo Gracia Gasca, investigador del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (ICMyL), explicó que “ *la resiliencia de los*

peces ha sido asombrosa y estudios individuales mostraron que no se afectaron sus músculos, la parte comestible de interés humano, sobre todo en especies de pesca comercial ". [18]

Como ya se mencionó, tras el hundimiento de la plataforma petrolera Deepwater Horizon y dada la importancia de conocer el comportamiento actual del Golfo de México se está trabajando para conocer los daños y efectos del derrame a través del Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM), fundado en 2015, se especializa en proyectos multidisciplinarios relacionados a posibles impactos ambientales de la industria del gas y petróleo en los ecosistemas marinos del Golfo de México.

En la actualidad el CIGoM desarrolla el proyecto "Plataformas de observación oceanográfica, línea base, modelos de simulación y escenarios de la capacidad natural de respuesta ante derrames de gran escala en el Golfo de México". Esta iniciativa es financiada por el Fondo de Hidrocarburos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y la Secretaría de Energía (SENER). El subproyecto al cual está ligado este trabajo de tesis tiene por nombre **Caracterización Ecológica de la zona Suroeste del Mar Profundo Del Golfo de México** que tiene el objetivo de hacer mediciones físicas, químicas y biológicas para establecer una línea de base del estado actual y variabilidad natural del ecosistema del Golfo de México. Entre las líneas de investigación se encuentra la caracterización del fitoplancton, microorganismo autótrofo capaz de llevar a cabo el proceso de fotosíntesis. La sección Fitoplancton y Producción Primaria en el "Laboratorio de Fitoplancton y Productividad de la UNAM" es donde se llevó a cabo el análisis del estado actual de la distribución del fitoplancton. Existen diferentes técnicas de análisis para determinar la concentración de fitoplancton, entre ellas se encuentran:

a. Cualitativo

Consiste en realizar una identificación de los taxa (grupo de organismos emparentados) presentes en la muestra, sin importar su cantidad a través de observaciones al microscopio.

b. Cuantitativo

La cuantificación del fitoplancton es realizada estadísticamente, ya que no es posible contar todos los individuos que se encuentran en la muestra. Existen varios métodos, uno de ellos es el de Sedgwick-Rafter. Para ello, se emplea la placa o cámara del mismo nombre, cuyas dimensiones son de 5 cm de largo por 2 cm de ancho y 1 mm de altura, con capacidad para 1 ml de muestra.

El recuento de organismos puede hacerse por campos o por franjas. Los resultados se dan en número de individuos/ml. [19] [20]

c. Semicuantitativo

Se aplica cuando no se necesita conocer el número exacto de organismos. Se realiza una identificación de la especie y se puede utilizar escalas de abundancia relativa en porcentaje, frecuencia relativa (muy abundante-abundante, frecuente, escaso) o porcentual, en base a un conteo aleatorio o a un estimado en el campo visual.

d. Método para análisis de pigmentos (clorofila “ a ”)

La concentración de clorofila “ a ” es una medida indirecta de la biomasa del fitoplancton útil para determinar la productividad primaria de un determinado ecosistema. El procedimiento para la determinación de la densidad óptica (absorbancia) de la clorofila se lleva a cabo mediante un espectrofotómetro [21].

En este trabajo de tesis para conocer la concentración de clorofila a se llevó a cabo la caracterización a través del método para análisis de clorofila a, por medio del fluorómetro modelo 10-AU marca Turner Desings y para entender el mecanismo de caracterización del fitoplancton en el Golfo de México por medio de la intensidad de fluorescencia emitida por la clorofila a en las siguientes secciones se presenta una breve descripción del mecanismo de fotosíntesis, proceso en el cual se deriva la emisión de luminiscencia llamada fluorescencia, así mismo se da la introducción a los conceptos básicos de la interacción de la luz con las moléculas fotoluminiscentes.

4.2. Conceptos de Física y Química

4.2.1. Fotosíntesis

La fotosíntesis o función clorofílica es la conversión de materia inorgánica a materia orgánica, mediante organismos fotosintéticos (*citoplasmáticos*).

Los orgánulos citoplasmáticos encargados de la realización de la fotosíntesis son los **cloroplastos**, estructuras polimorfas de color verde debido a la presencia del pigmento **”clorofila”** propias de las células vegetales.

El proceso comienza con la energía lumínica procedente de la luz que es absorbida por la clorofila, cuando la molécula de pigmento absorbe un fotón

con la cantidad justa de energía, pasa a un estado de excitación; es decir, se excitan los electrones externos de la molécula, los cuales pasan a otra molécula adyacente (separación de cargas), y producen una especie de corriente eléctrica en el interior del cloroplasto a través de la cadena de transporte de electrones [22], como se ilustra en la figura (4.1)

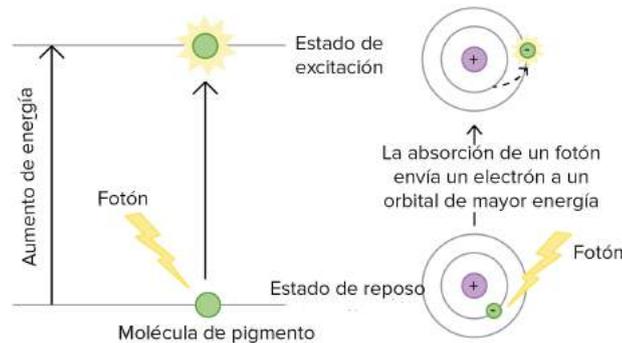


Figura 4.1: Fotosíntesis dependiente de la luz en la fotosíntesis [22].

Por tanto en este proceso la energía lumínica se transforma en energía química estable, siendo el NADPH (Nicotín, Adenín, Dinucleótido Fosfato) y el ATP (Adenosín Trifosfato) las primeras moléculas en la que queda almacenada esta energía química. Con posterioridad, el poder reductor del NADPH y el potencial energético del grupo fosfato del ATP se usan para la síntesis de hidratos de carbono a partir de la reducción del dióxido de carbono, para producir biomasa [23], en el contexto energético, la biomasa puede considerarse como la materia orgánica originada en un proceso biológico, utilizable como fuente de energía. [24].

Como se mencionó anteriormente, en el proceso de la fotosíntesis cuando la radiación electromecánica incide sobre la clorofila *a*, esta absorbe radiación, en la Figura (4.2) se pueden ver los espectros de absorción de tres pigmentos importantes en la fotosíntesis: clorofila *a*, clorofila *b* y β -caroteno, en esta figura se observa que el conjunto de longitudes de onda que un pigmento no absorbe, se refleja, y la luz reflejada es lo que vemos como color. Por ejemplo, percibimos las plantas de color verde por su gran contenido de moléculas de clorofila *a* y *b*, que reflejan luz verde. [25].

Además, es importante mencionar que todas las plantas fotosintéticas, algas y cianobacterias contienen clorofila *a* [26] [27], debido a esto la concentración de clorofila *a* es utilizada para estimar en forma indirecta la biomasa

de las comunidades fitoplanctónicas, debido a que es el principal pigmento fotosintético presente en las alga. [28]

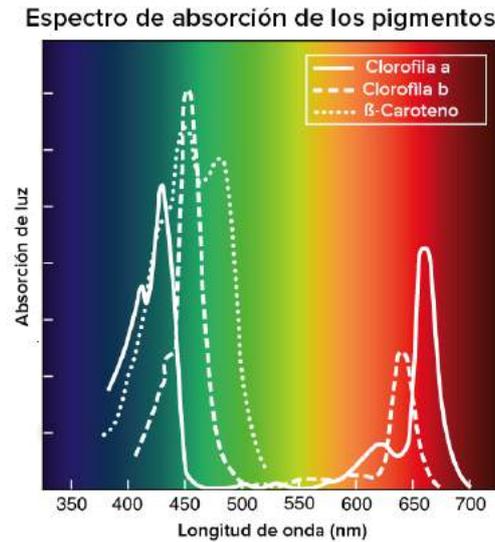


Figura 4.2: Espectro de absorbancia de la clorofila a, clorofila b y betacaroteno [29].

4.2.2. Clorofila - a

Aunque tanto la clorofila *a* como la clorofila *b* absorben luz, **la clorofila a tiene una función única y crucial al convertir la energía de la luz en energía química**; es decir, este pigmento en la fotosíntesis absorbe fotones de luz, los cuales producen un aumento de energía, y como resultado del aumento de energía se genera energía química estable. En la figura (4.3) se ilustra una molécula de clorofila a, a nivel estructural se componen de una cola hidrófoba que se inserta en la membrana del tilacoide y una cabeza de anillo de porfirina (un grupo circular de átomos que rodean a un ion magnesio) que absorbe la luz [30] [31].

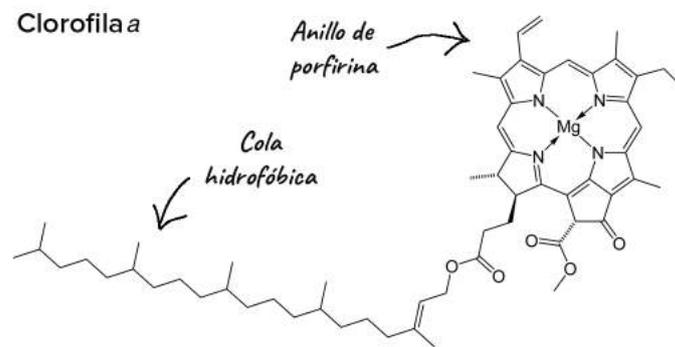


Figura 4.3: Imagen de una molécula de clorofila a [31].

Consecuencia del comportamiento de la clorofila a frente a la luz, se presentan fenómenos luminiscentes derivados de la absorción o emisión de la radiación electromagnética, a continuación en la siguiente sección se presentan algunos fundamentos de radiación electromagnética, útiles para comprender como la energía lumínica procedente de la luz es absorbida o emitida.

4.2.3. Radiación Electromagnética

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, que se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro, es portadora de una cantidad de energía y presenta características específicas según la longitud de onda en que se halle inscrita. La longitud de onda λ es definida como la distancia en metros, entre dos crestas de una onda como se observa en la figura (4.4).

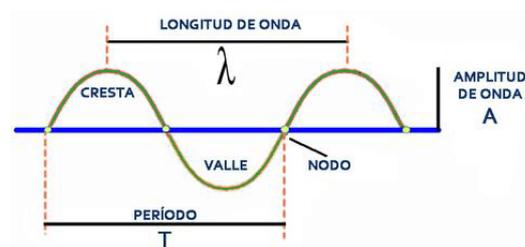


Figura 4.4: Longitud y otras propiedades de onda [32]

La radiación electromagnética puede manifestarse de diversas maneras y recibe diferentes nombres, desde los rayos gamma (con una longitud de onda del orden de picómetros) hasta las ondas de radio (longitudes de onda del orden de kilómetros), pasando por el espectro visible (cuya longitud de onda

está en el rango de las décimas de micrómetros), en el caso de la luz visible en nanómetro. El conjunto de las ondas electromagnéticas que componen la radiación electromagnética se les denomina espectro electromagnético.

Un espectro depende de la separación entre niveles de energía, por lo que las transiciones entre los correspondientes niveles de energía dan lugar a emisión o absorción de radiación en distintas zonas de frecuencia. Por esto, se pueden distinguir distintos tipos de espectros según los niveles de energía que intervienen. Para explicar los fenómenos asociados con la absorción o emisión es necesario considerar la radiación electromagnética como un flujo de partículas discretas de energía llamadas **fotones**.

Cada partícula de radiación electromagnética, es llamada **fotón**, el cual tiene una cantidad fija de energía que puede ser asociada con la frecuencia o longitud de onda. Los tipos de radiación con longitud de onda corta tienen fotones de alta energía, mientras que aquellos con longitud de onda larga tienen fotones de baja energía [33] como se muestra en la siguiente figura (4.5) .

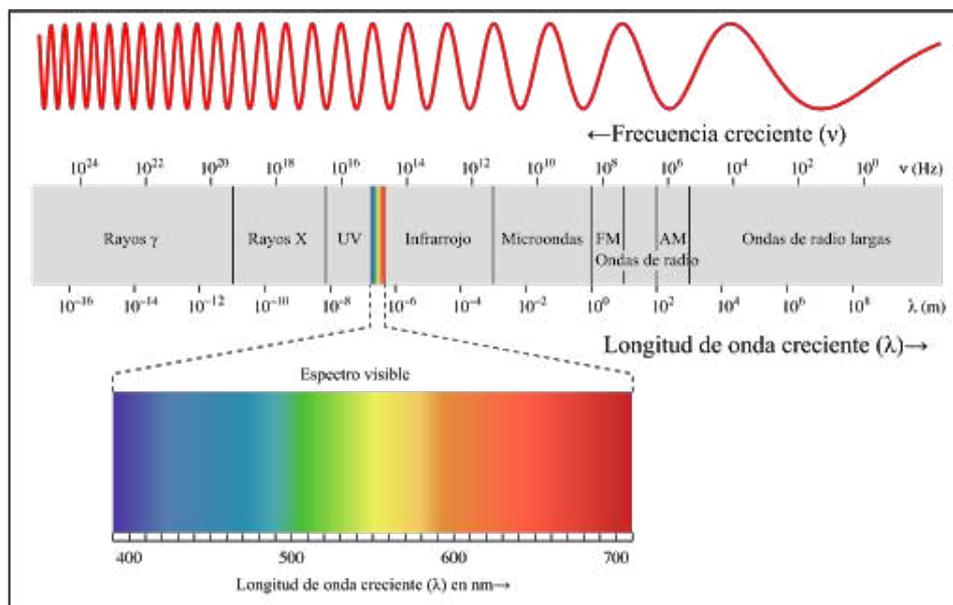


Figura 4.5: Espectro de las ondas electromagnéticas [34]

La energía de un fotón es proporcional a la frecuencia de la radiación según la ecuación (4.1) [35].

$$E = h * \nu \quad (4.1)$$

donde:

h es la constante de Planck ($h = 6.63 \times 10^{-34}$ J.s.)

v es la velocidad de excitación.

La radiación electromagnética en ciertas longitudes de onda pueden ser absorbida por una sustancia de acuerdo a su estructura molecular, esta absorción ocurre cuando un fotón incidente excita y origina la transición de un electrón de una estado menor a un estado mayor de energía, eventualmente el electrón pierde esta energía y por medio de un proceso de radiación regresa a su estado inicial, esta radiación emitida por la molécula es definida como luminiscencia.

4.3. Luminiscencia

Según el tipo de energía de excitación usada para estimular la emisión, la luminiscencia es renombrada añadiendo el prefijo correspondiente como por ejemplo: Fotoluminiscencia, Catodoluminiscencia, Radioluminiscencia, Bioluminiscencia, Triboluminiscencia. La emisión de un material luminiscente es clasificada en **fluorescencia** o **fosforescencia** dependiendo del tiempo que tarda en desexcitarse un átomo que previamente ha sido excitado, este tiempo es denominado “ tiempo de vida (τ)”.

La expresión de la **ley de decaimiento**, ecuación (4.2) [36] se aplica tanto a la fluorescencia como a la fosforescencia.

$$I_t = I_0 * e^{-kt} \quad (4.2)$$

donde:

la constante k es diferente para cada uno.

Esta expresión relaciona la intensidad emitida I_t y el tiempo transcurrido t desde el cese de la excitación. Siendo el tiempo de vida del evento de fotoluminiscencia $\tau = \frac{1}{k}$ [seg].

Es llamada **fosforescencia** cuando $\tau \geq 10^{-8}$ s, en este caso la emisión de luz puede ser observada aun después de remover la fuente de excitación, siendo que corresponde a un decaimiento prolongado de I_0 (expresión (4.2)) puede durar hasta minutos luego de desaparecer el estímulo. Por otro lado si $\tau \leq 10^{-8}$ s, se tiene **fluorescencia**, es decir que el proceso luminiscente persiste solo si continúa la excitación. [37].

Por lo tanto la fluorescencia corresponde a un decaimiento instantáneo de I_0 (expresión (4.2)) dura únicamente mientras dura el estímulo, es un fenómeno virtualmente instantáneo. Según la **ley de Stokes**, el máximo de emisión de un compuesto fluorescente se sitúa a una longitud de onda mayor que la que corresponde al máximo de su banda de absorción como se muestra en la Figura (4.6) donde se observa que las bandas de fluorescencia molecular están formadas principalmente por bandas que tienen longitudes de onda más largas y, por tanto, energías menores que la banda de radiación responsable de su excitación. Este desplazamiento hacia longitudes de onda mayores se llama desplazamiento o corrimiento de Stokes [38].

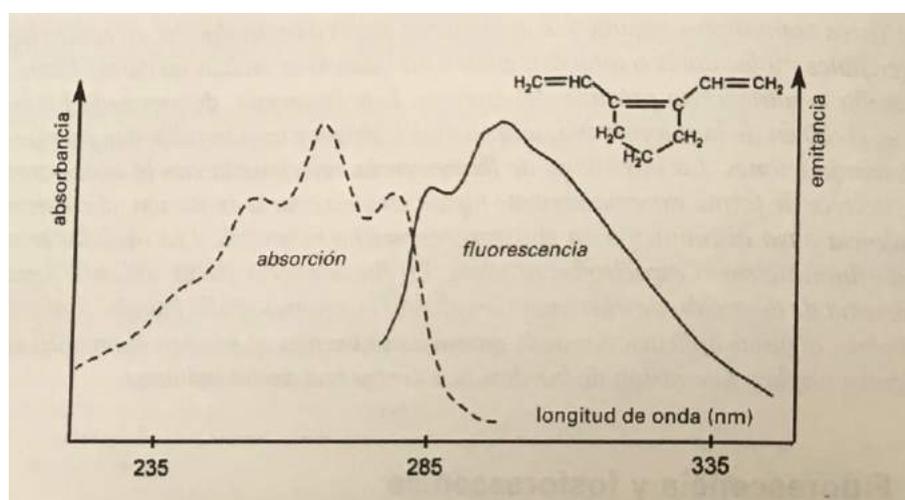


Figura 4.6: Representación sobre un mismo gráfico de espectros de absorción y emisión de fluorescencia de un compuesto etilénico [39].

4.4. Variables que afectan la Fluorescencia

Como se expuso en la sección anterior la fluorescencia es un fenómeno que caracteriza a las sustancias que son capaces de absorber energía en forma de radiaciones electromagnéticas y luego emitir parte de esa energía en forma de radiación electromagnética de longitud de onda diferente. [40] Cada factor ambiental modifica de manera particular el aparato fotoquímico [41] aquí se mencionan algunos factores que modifican el valor de la fluorescencia.

- Temperatura y disolvente:** La eficacia cuántica de la fluorescencia disminuye en muchas moléculas con el aumento de la temperatura, ya

que el aumento de la frecuencia de las colisiones a temperatura elevada hace aumentar la probabilidad de desactivación no radiante (conversión externa). Las temperaturas altas modifican la fluidez de la membrana, alterando el funcionamiento de las proteínas transportadoras de electrones [42].

Una disminución en la viscosidad del disolvente también aumenta la probabilidad de conversión externa y produce el mismo resultado. Las temperaturas altas modifican la fluidez de la membrana, alterando el funcionamiento de las proteínas transportadoras de electrones [42].

- **Efecto del pH:** La fluorescencia de un compuesto aromático con sustituyentes ácidos o básicos en el anillo depende normalmente del pH. Tanto la longitud de onda como la intensidad de emisión son probablemente diferentes para la forma ionizada y no ionizada del compuesto. Por lo tanto será muy frecuente en los métodos fluorimétricos el control estricto del pH.
- La intensidad de fluorescencia es diferente en cada punto de la disolución ya que una parte de la emisión de fluorescencia se encuentra atrapada antes de salir de la célula. La intensidad de fluorescencia medida por el detector corresponde a la resultante de las emisiones fluorescentes de pequeños volúmenes individuales presentes en el espacio delimitado.
- El efecto de atenuación luminoso debido al solapamiento parcial de los espectros de absorción y de emisión, denominados también autoabsorción o filtro interno, es incrementado por posibles transferencias de energía de especies excitadas con otras moléculas o iones extraños por colisiones o formación de complejos (quenching dinámico). [43]
- **Efecto de la Salinidad:** La salinidad provoca por una parte la modificación de la estructura de las membranas tilacoides y por otro lado inhibe parcialmente el ciclo de Calvin [44], disminuyendo el rendimiento cuántico. El ciclo de Calvin (ciclo de la fijación del carbono de la fotosíntesis) consiste en una serie de procesos bioquímicos que se realizan en el estroma de los cloroplastos de los organismos fotosintéticos. [45]

Así podemos observar que la proporción de luz fluorescente que logra pasar al sensor, así como la proporción de la luz excitante (solar, foco o láser), depende de las propiedades ópticas del agua. Una rama de las ciencias físicas que estudia la interacción entre la **radiación electromagnética** y la **materia** es la espectroscopía; se ocupa del estudio del *espectro electromagnético*, los diversos métodos para obtener el espectro, su medida y hasta su

aplicación, dando interpretación teórica de la relación atómica-molecular de la materia [46]. La espectroscopía se basa en la medición de la transmitancia T o de la absorbancia A de soluciones que tienen una longitud de trayectoria, basado en la ley de Lambert y Beer [47].

4.5. Ley de Lambert y Beer

Como ya se mencionó en el capítulo 1, cuando ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos son excitados mediante radiaciones luminosas en el rango visible o del ultravioleta próximo, absorben o remiten la energía recibida parcialmente. En la figura (4.7), se ilustra con un diagrama esquemático un experimento espectrofotométrico donde se muestra una fuente de luz monocromática, con una irradiancia P_0 , que incide en una muestra de longitud l , donde P_0 y P hacen referencia a potencia de la radiación. La irradiancia del haz que sale por el lado opuesto de la muestra es P . Como la muestra puede haber absorbido algo de luz, $P \leq P_0$ [48].

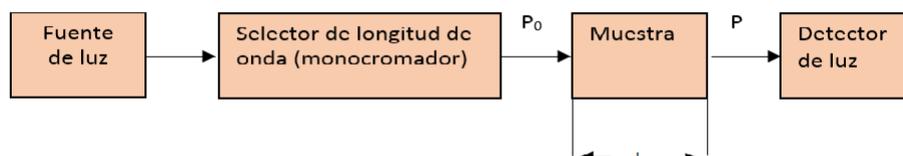


Figura 4.7: Diagrama esquemático de un experimento espectrofotométrico de haz simple. P_0 , irradiancia del haz que entra en la muestra; P , irradiancia del haz sale de la muestra; l , longitud del camino óptico a través de la muestra.

Con lo anterior tenemos el concepto de transmitancia T , que se define como la fracción de la luz incidente que pasa a través de la muestra.

$$T = \left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (4.3)$$

La absorbancia se define como:

$$A = \log\left(\frac{P_0}{P}\right) = -\log(T) \quad (4.4)$$

La ecuación de Lambert, expresión (4.5), relaciona la absorción de la luz con las características de medio donde atraviesa y el camino recorrido [49] [50], es decir:

$$A = \log\left(\frac{P_o}{P}\right) = bl \quad (4.5)$$

donde:

P_o es la intensidad de la luz incidente,

P es la intensidad de la luz transmitida,

l es la longitud por donde pasa la luz en el medio.

$b = 2,303k$

k es la constante del medio.

La ley de Beer dice que la cantidad de luz absorbida es proporcional al número de moléculas del cromóforo a través del cual pasa la luz, recordemos que cromóforo se define como una sustancia que tiene electrones capaces de absorber energía y excitarse, a diferentes longitudes de onda [51].

$$A = \varepsilon lc \quad (4.6)$$

Donde:

A = absorbancia

ε = Depende del cromóforo en si mismo, de λ (longitud de onda) y de las condiciones de medida (pH, T...).

l = Trayectoria de la radiación a través de la muestra.

c = Concentración, es una característica propia del cromóforo.

Ley de Lambert y Beer

Retomado la ecuación (4.5) y la ecuación(4.6) , obtenemos:

$$A = \log\left(\frac{1}{T}\right) = \log\left(\frac{I_o}{I}\right) = \varepsilon cl \quad (4.7)$$

$$A = \varepsilon cl \quad (4.8)$$

La ecuación (4.8), es el fundamento de la espectrofotometría, se denomina ley de Lambert-Beer y de acuerdo ella, *la absorbancia es importante porque es directamente proporcional a la concentración, c, de la especie que absorbe la luz en la muestra* [52].

Ahora sabemos que la intensidad de la luz con una longitud de onda específica que sale o se transmite con la intensidad de la luz específica que ingresa o incidente está directamente relacionada con la concentración de la clorofila. Revisados los conceptos básicos ligados a la caracterización del fitoplancton a través de la concentración de clorofila a, en el siguiente capítulo se presentan los instrumentos empleados para medir la intensidad de fluorescencia, así mismo se detalla la estructura de los datos que se obtiene de ellos.

Capítulo 5

Instrumentación

En este capítulo se presentan los aspectos importantes en la instrumentación utilizada para la medición de fluorescencia emitida por el fitoplancton, se dará una introducción a los instrumentos utilizados durante la campaña.

Uno de los instrumentos utilizados fue el fluorómetro, en este proyecto se utilizó el método 445.0 IN VITRO para determinar la clorofila a del fitoplancton en agua marina, este método fue publicado y evaluado por La Agencia Estatal de Protección del Medio Ambiente (U.S. EPA). En este método se recomienda el uso del fluorómetro Marca Turner Designs Modelo 10 para evaluar el valor de concentración en la muestra. Con el método IN-VITRO se detecta niveles bajos de clorofila a, feofitina a en agua marina [54] [55]. La feofitina o feofitina (abreviado Pheo) es un compuesto químico que sirve como el primer portador de electrones intermedio en la vía de transferencia de electrones de FOTOSISTEMA II (PS II) [56].

5.1. Fluorómetro Marca Turner Designs Modelo 10AU-005-CE Serie 1100332

El *Fluorómetro o Fluorímetro* es un instrumento que mide la radiación fluorescente emitida por una muestra expuesta a la radiación electromagnética conocida [57], permite el análisis, la identificación y la cuantificación de moléculas susceptibles de presentar fluorescencia. Las características del fluorómetro TURNER 10-AU-005-CE (ver figura 5.1) que son relevantes en esta investigación son:

- Resistente al agua de una lluvia.
- El equipo soporta movimiento durante la operación.

- Puede ser transportado por un vehículo, barco etc.
- Puede funcionar en flujo discontinuo, es decir, con una muestra estática o continuo con una muestra en movimiento con la ayuda de una bomba.
- Los parámetros de funcionamiento del fluorómetro Turner 10-AU-005-CE corresponden a una fluorescencia relativa (proporcional a la concentración de la muestra) formato RAW, siendo que el rango automático es en respuesta a los niveles de concentración, los tres rangos de concentración son: alto (“HIGH”), medio (“MED”) y bajo (“LOW”). El rango alto lee muestras 10 veces más concentradas que el rango medio y el medio lee muestras 10 veces más concentradas que el rango bajo, donde valor de concentración mínimo es de 0 RAW y como concentración máxima 9999,999 RAW.
- Los rangos de concentración que pueden ser leídas en $\mu\text{g/L}$ son : 0-2 $\mu\text{g/L}$ en bajo (LOW), 2-20 $\mu\text{g/L}$ en medio (MED) y 20- 200 $\mu\text{g/L}$ en alto (HIGH) [59].



Figura 5.1: 10AU Field and Laboratory Fluorometer [59]

A continuación se presenta el principio de operación del Fluorómetro Marca Turner Designs Modelo 10AU-005-CE.

5.1.1. Fluorómetro: Principio de Operación

- Comienza con la luz de excitación que emite la lámpara, esta pasa a través del filtro de color (filtro de excitación) que permite el paso de un rango de longitud de onda a través de la muestra.
- Paso siguiente la muestra emite una luz proporcional a la concentración de fluorescencia del material fluorescente, ver ecuación 4.8 (Ley de Lambert y Beer)

- Después la luz emitida por la muestra se dirige hacia una esfera que hace de cabezal del detector, pasando a través de otro filtro óptico (filtro de emisión). El propósito del filtro de emisión es que la longitud de onda emitida que llegue al tubo fotomultiplicador sea específicamente el que se tiene interés de analizar.
- El fotomultiplicador, genera un flujo de corriente en función de un número de fotones incidentes en él. Consta de un fotocátodo donde se producen electrones que se aceleran por una serie de electrodos.
- Del fotomultiplicador se produce una señal que se dirige a la pantalla digital y a la memoria del dispositivo o a un almacenamiento externo.

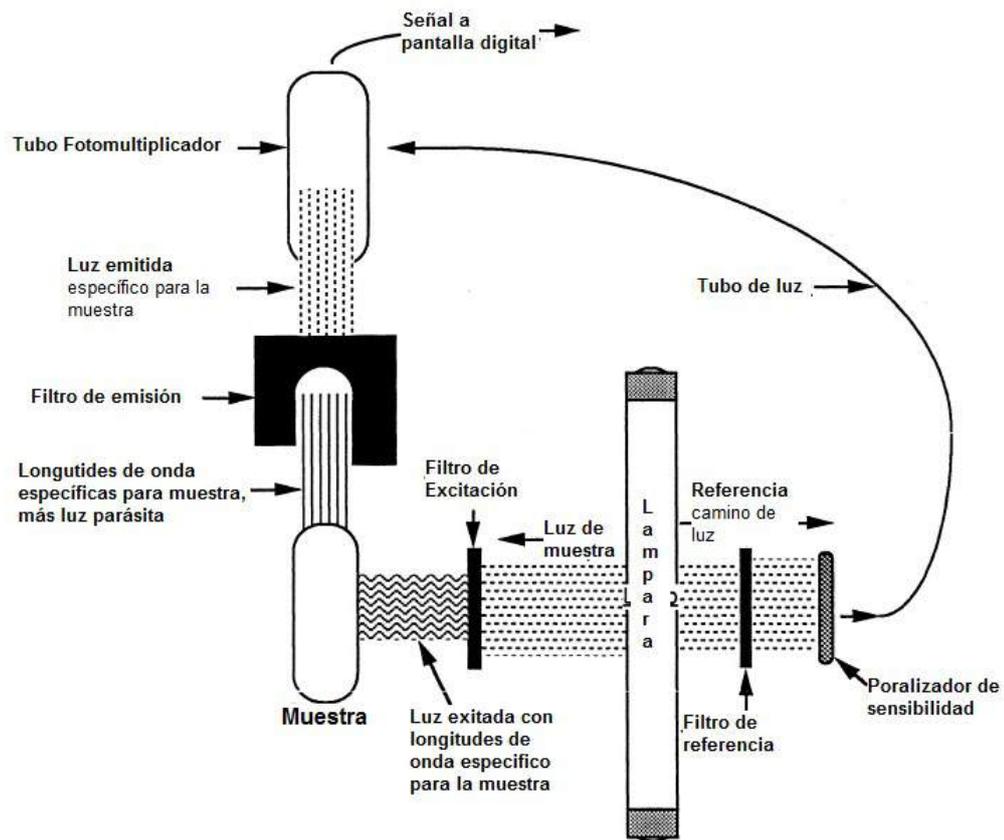


Figura 5.2: Sistema Óptico del modelo 10AU [59]

Para que la principal aplicación del instrumento sea la detección de **Clorofila a** en agua salada, la fuente de luz y los filtros del kit óptico 10-037 R

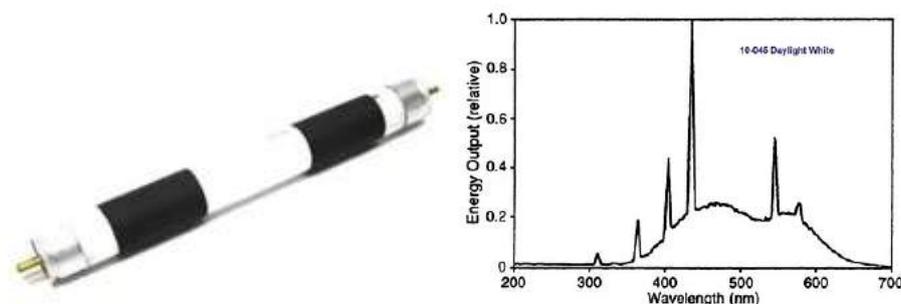
se instalaron en el fluorómetro en la fábrica, a continuación se presentan los elementos instalados que hacen que el instrumento fluorómetro sea capaz de realizar la correcta detección de la clorofila a.

5.1.2. Configuración del instrumento

Es importante mencionar las consideraciones primarias que se tuvieron para la selección de filtro, fuente de luz y detector de luz:

- 1.- La fuente de luz y el filtro de excitación deben permitir el paso de la luz a través de la muestra que a su vez absorberá las longitudes de onda.
- 2.- El detector de luz y el sistema de filtro de emisión debe de ser lo suficiente sensible para las longitudes de onda emitidas por la luz de la muestra que comenzara a ser analizada.

El dispositivo utiliza como **fuentes de luz** una lámpara blanca diurna (ver figura 5.3 (a)) que dependiendo de la energía suministrada será la intensidad que emite, como se muestra en la figura 5.3 (b), así mismo cuenta con un **filtro de referencia** (ver figura 5.4) que tiene un rango de filtro de 400-700 nm (ver figura 5.4), como **Filtro de excitación**: (ver figura 5.5) utiliza el filtro de paso de banda redondo de 340-500 nm y para el **Filtros de emisión** (ver figura 5.6) utiliza el filtro corte afilado redondo de 665 nm



(a) Lámpara Blanca Diurna: 10-045 (b) Diagrama: Lámpara Blanca Diurna

Figura 5.3: Fuente de luz modelo 10-045



Figura 5.4: Diagrama: Filtro de Referencia modelo 10-032 Cuadrado 1 ND



Figura 5.5: Filtro de excitación modelo 10-050R



Figura 5.6: Filtros de emisió modelo 10-051R

El software integrado del instrumento arroja la información en una cadena de datos, es de suma importancia conocer la estructura para el correcto

análisis. La información es guardada en un documento de texto a través del software C3 Submersible Fluorometer y/o en la memoria interna del dispositivo.

5.1.3. Estructura de datos de fluorescencia

La cadena de datos en serie sigue el protocolo de datos en serie: RS-232; 4800/9600 baudios; 8 bits de datos; 1 bit de parada.

Aquí se muestra una línea de datos enviados desde el fluorómetro (ASCII):

0 5684 :: 9/06/18 21:23:19 = 6.713 (RAW) 29.1 (C)

Donde:

- 0 = Marcador (de 0 a 8)
- 5684 = índice de cuatro dígitos
- :: = separador (2 ASCII OX3D)
- 9/06/18 21:23:19 = Mes / Fecha / Año
- = =Separador (ASCII OX3D)
- 6.713 = Señal (Máximo 7 dígitos: XXXX.XXX)
- (RAW) = Unidades de medida de señal
- 29.1 = Temperatura a un decimal
- (C) = Nomenclatura de Temperatura

Ya que la adquisición se llevo a cabo en 63 estaciones a lo largo del golfo de México, fue indispensable geoposicionar dichas muestras con la ayuda del GPS. A continuación se da una introducción al dispositivo.

5.2. GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un sistema de radionavegación de los Estados Unidos de América, basado en el espacio, que proporciona servicios fiables de posicionamiento, navegación, y cronometría [61].

El GPS se compone de tres elementos:

- **Satélites del GPS** en órbita alrededor de la Tierra, transmiten señales que reciben e identifican los receptores del GPS,
- **Estaciones terrestres** de seguimiento y control, y
- **Receptores del GPS** propiedad de los usuario, estos proporcionan por separado sus coordenadas tridimensionales de latitud, longitud y altitud, así como la hora local precisa.

Los datos que recibimos en el módulo GPS siguen el protocolo NMEA (siglas de National Marine Electronics Asociation), las cuales son sentencias estándares para la recepción de datos GPS. El protocolo estándar NMEA 2000 define los requerimientos de datos y tiempo de transmisión en el formato serial a una velocidad cuya velocidad se mide en baudios (bits por segundo) [62].

5.2.1. Estructura de Datos de GPS

Ejemplo de sentencia recibida [63]

\$GPGGA,123519,4807.038,N,01131.000,E,1,08,0.9,545.4,M,46.9,M,,*47

Donde:

- **GGA** Datos del sistema de posicionamiento global
- **123519** UTC (Universal Time Coordinated) significa en español “Tiempo Coordinado Universal”. **12:35:19 UTC**
- **4807.038**, N Latitud 48 grados 07.038 'N
- **01131.000**, E Longitud 11 grados 31.000 'E
- **1** Calidad del arreglo:
 - 0 = inválido
 - 1 = GPS fijo (SPS)
 - 2 = corrección DGPS
 - 3 = corrección de PPS
 - 4 = cinemática en tiempo real
 - 5 = RTK flotante

- 6 = estimado (cómputo muerto)
 - 7 = modo de entrada manual
 - 8 = modo de simulación
-
- **08** Número de satélites que están siendo rastreados
 - **0.9** Dilución horizontal de la posición
 - **545.4,M** Altitud, metros, sobre el nivel medio del mar.
 - **46.9,M** Altura del geoide (nivel medio del mar) sobre WGS84 elipsoide
 - **(campo vacío)** tiempo en segundos desde la última actualización de DGPS
 - **(campo vacío)** número de identificación de la estación DGPS
 - ***47** Los datos de la suma de control, siempre comienzan con *

Como se mencionó en el capítulo 1.5, dentro de las variables que afectan la fluorescencia se encuentra la salinidad dado que altos niveles afecta el proceso de fluorescencia, por esta razón en la siguiente sección se muestra las características generales del instrumento termosalinómetro SBE 45 Micro TSG el cual se utilizó para recopilar datos de salinidad superficial.

5.3. Termosalinómetro SBE 45 Micro TSG

El *termosalinómetro* es un instrumento diseñado para recoger datos de temperatura, salinidad y conductividad del agua con una elevada precisión [64]. El Termosalinómetro SBE 45 Micro TSG figura (5.7), es un monitor de alta precisión, diseñado para la determinación a bordo de la conductividad y la temperatura de la superficie del mar (agua bombeada), a través de comunicación serial con el ordenador para la recolección de datos es a través del cable RS-232, Baud Rate: 9600 [65].



Figura 5.7: SBE 45 Micro TSG (Termosalinómetro)

Estructura de Datos

Todos los datos están separados con una coma y un espacio.

ttt.tttt, cc.ccccc, sss.ssss, vvvvv.vvv

Donde:

- t = temperatura (Grados Celsius, ITS-90)
- c = Conductividad (S/m)
- s = Salinidad (psu, unidades prácticas de salinidad o gramos de sal por litro (de Atlas oceánico mundial 2001)
- v = Velocidad del Sonido (metros/segundos)

Como se menciona en los capítulos 3 y 4, el fitoplancton es base de los ecosistemas acuáticos se optó por la determinación de la clorofila a como método indirecto para la adquisición de la concentración de este en el Golfo de México. Ahora que se conocen los instrumentos utilizados para la adquisición de datos en el siguiente capítulo se presenta la metodología llevada a cabo para lograr la caracterización Ecológica de la zona Suroeste del Mar Profundo Del Golfo de México.

Capítulo 6

Metodología

En este capítulo se presenta la metodología, la cual comprende

1. Proceso de adquisición de datos
2. Programa de muestreo: Toma y medición de fluorescencia en sitio.
3. Programa de procesamiento: tratamiento de muestras.
4. Análisis Digital: Mapas de concentración de fluorescencia.

6.1. Proceso de adquisición de datos

El objetivo principal fue adquirir datos de concentración de fluorescencia de clorofila *a* en el Golfo de México durante la campaña denominada **Campaña Oceanográfica SOGOM 04** (Suroeste del Golfo de México 04) a bordo del B/O JUSTO SIERRA, con fecha de inicio del 28 de agosto 2018 al 11 de septiembre de 2018. Para la adquisición de datos se consideraron 63 estaciones y sus respectivos transectos. Debido a la relación lineal entre la concentración de clorofila *a* y la concentración del fitoplancton (ver tema 4.5) los datos recabados durante la campaña de variabilidad de fitoplancton superficial proveerán una base para establecer un indicador ambiental.

En la figura 6.1 se presenta un mapa con las estaciones que abarco la investigación, las cuales se encuentran ubicadas dentro de un área bordeada al oeste, sur y sureste por Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán.

Del 26 al 28 de agosto del 2018 se hizo uso de las instalaciones del Segundo Laboratorio General que se muestra en la Figura 6.2, donde se instaló



Figura 6.3: Cable RS- 232 de las instalaciones del B/O JUSTO SIERRA

Instalado el fluorómetro, se realizaron pruebas del funcionamiento con el software diseñado para la adquisición de los datos crudos durante la campaña SOGOM-IV (FLUOROMETRO SOGOM4-1), las mediciones que se realizaron como primeras pruebas de funcionamiento en el muelle del buque oceanográfico Justo Sierra fueron del orden de 6.0 [RAW] en una escala de 0 a 9.0 [RAW].

Se dejó el muelle en Tuxpan, Veracruz para comenzar operaciones, así las primeras mediciones comenzaron el 29 de agosto de 2018. Una vez que el capital del navío indicaba la llegada a una estación se procedía a recopilar en un nuevo documento la información desde la llegada hasta la partida de mismo, posteriormente se iniciaba otro archivo para el traslado hacia la siguiente estación. Para entender con más claridad la recopilación de la información por estación y transito es las siguientes secciones se presenta una descripción del programa de adquisición y de procesamiento.

6.1.1. Adquisición de datos del FLUORÓMETRO DE REGISTRO CONTINUO MODELO 10-AU Marca TURNER DESINGS

Programa de Adquisición de Datos

Se realizó un programa de adquisición de datos para concatenar los datos recopilados por tres instrumentos, se consideró 4 variables (fluorescencia, temperatura del instrumento fluorómetro, salinidad y ubicación), los cuales son recopilados en una base de datos única para posteriormente ser procesados. El software integrado del fluorómetro no tiene la posibilidad de integrar las otras variable por lo tanto se optó por realizar un programa con el cual

se pudo recopilar la información.

Nombre del programa FLUOROMETRO SOGOM4-1, Versión 1.1, año 2018.

Evelio Joaquin Espinoza

Tutor M en C. Arturo Ronquillo Arvizu

Descripción:

Programa que concatena la señal del GPS y Termosalinómetro proveniente de la computadora central del buque "Justo Sierra" con los datos del Fluorómetro de Registro continuo, dicha información se guarda en un documento de texto simple (.txt), se presenta el diagrama de flujo del programa ver figura 6.4. Primero se inician tres variables en blanco a las cuales se les asignara el valor de la cadena recibida por cada instrumento, leídos los datos se concatenan agregando un contador para posteriormente ser guardado en un archivo de texto simple, todos los datos son visualizados en la interfaz en tiempo real. El programa de adquisición de datos cuenta con 5 índices o apartados. En todo momento están visibles las instrucciones de uso ver figura 6.5.

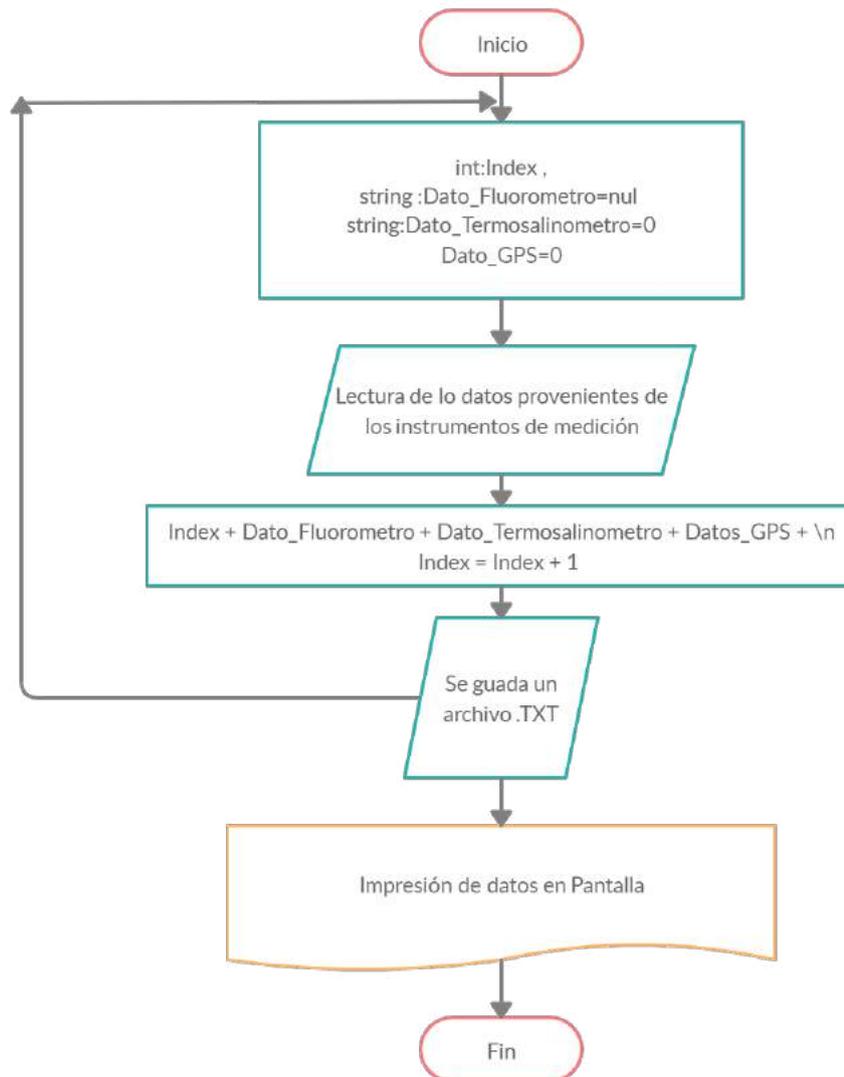


Figura 6.4: Diagrama de Flujo del programa de Adquisición de Datos : FLUOROMETRO SOGOM4-1



Figura 6.5: Captura de pantalla de las instrucciones

Índice del Programa FLUOROMETRO SOGOM4-1

1. Fluorescencia

Pantalla principal del programa ver figura 6.6 (a) dónde se observa a la derecha el índice de Fluorescencia y temperatura del instrumento, y a la izquierda la configuración del puerto serial RS-232.
2. GPS

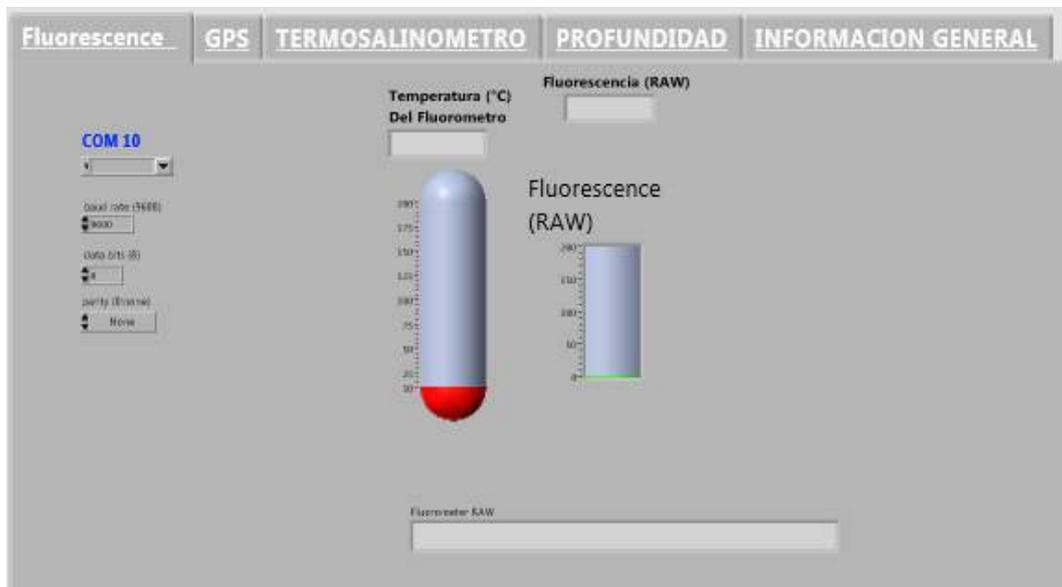
Con el fin de georreferenciar los datos de fluorescencia, se obtuvo del GPS provenientes del Puente, se tomó la cadena \$GPGGA y se extrae la latitud y la longitud en grados, minutos décimas de minuto, y se muestran en tipo real en la pantalla, ver figura 6.6 (b)
3. Termosalinómetro

Datos Obtenidos del instrumento llamado Termosalinómetro, en esta pantalla ver figura 6.7 (a) se observa a la derecha los datos de salinidad, y a la izquierda la configuración del puerto serial RS-232.
4. Profundidad

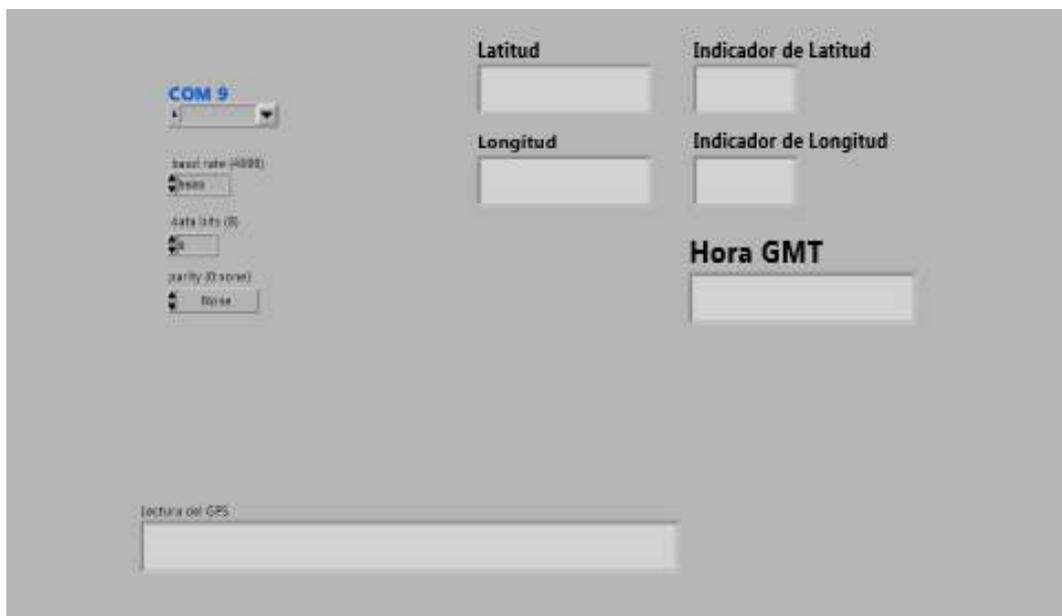
Para esta campaña se optó por observar la profundidad Figura 6.7 (b).
5. Información General

En este apartado ver figura 6.8 se selecciona la ubicación de los archivos y se presenta una visualización de los datos crudos que se almacenan en el archivo.

Para la configuración y correcto inicio del programa se requiere seleccionar el puerto en el cual se encuentra conectada la señal de entrada del instrumento, al igual que la velocidad en Baudios.



(a) Índice de Fluorescencia



(b) índice GPS

Figura 6.6: Índice del Programa FLUOROMETRO SOGOM4-1



(a) índice TERMOSALINOMETRO



(b) índice Profundidad

Figura 6.7: Índice del Programa FLUOROMETRO SOGOM4-1



Figura 6.8: Captura de pantalla de índice General

En la sección siguiente se describe el formato de datos crudos que se obtienen del programa.

6.1.2. Datos Crudos

Es importante mencionar que *datos crudos* es un termino para los datos que se recogen desde una fuente es decir que no han sido sujetos al procesamiento u otra manipulación. La cadena que envía el programa tiene el siguiente formato, ver figura 6.9.

- Índice General

Ejemplo: 0

- Fluorómetro

Índice :: Fecha y Hora Fluorescencia[RAW] Temperatura del Fluorómetro [°C]

Ejemplo:

0 5684 :: 9/06/18 21:23:19 = 6.713 (RAW) 29.1 (C)

- Coordenadas GPS

Latitud Longitud

Ejemplo:

2030.1261 N 09329.8368 W

- Termosalinómetro

Dato, Salinidad, Temperatura del Instrumento

Ejemplo:

29.8905, 6.05396, 36.5640

```

Estacion 19 Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGIA
LABORATORIO DE INSTRUMENTACION OCEANOGRAFICA
CRUCERO SOGOM-4
INDEX FECHA HORA LATITUD LONGITUD FLUORESCENCIA TEMPERATURA DEL FLUOROMETRO
Termosalinometro / fluorescencia / GPS / PROFUNDIDAR

M.en C. Arturo Ronquillo Arbizu
Estudiante Evelio Joaquin Espinoza
M. en C. Ruth Luna Soria
0
SDPT,1371.51,4.50°71
1
2
3
2000.6179 N 09400.6839 W
SDPT,1371.34,4.50°72
4
5
0 0686 :: 9/07/18 04:20:09 = 4.989 (RAW) 28.9 (C)

```

Figura 6.9: Captura de pantalla Datos SOGOM 4 RAW

6.2. Procesamiento de Datos

Programa de procesamiento de Datos

Nombre del programa : Programa de procesamiento de Datos SOGOM, Versión 1.5, año 2018.

Evelio Joaquin Espinoza

Tutor M en C. Arturo Ronquillo Arvizu

Descripción:

Programa con el cual se elimina el ruido de los archivos de texto simple. Como se observa en el diagrama de flujo ver figura 6.10 primero se inician seis variables en blanco, de un archivo de texto simple se recuperan los datos recopilados, leídos los datos se asignan a las variables en blanco para concatenarlos con el formato requerido para ser utilizado en el SOFTWARE Ocean Data View (ODV). Se dividieron los datos en Estaciones Día, Estaciones noche, Transito Día, Transito Noche, con la finalidad de observar la diferencia de concentración de fluorescencia.

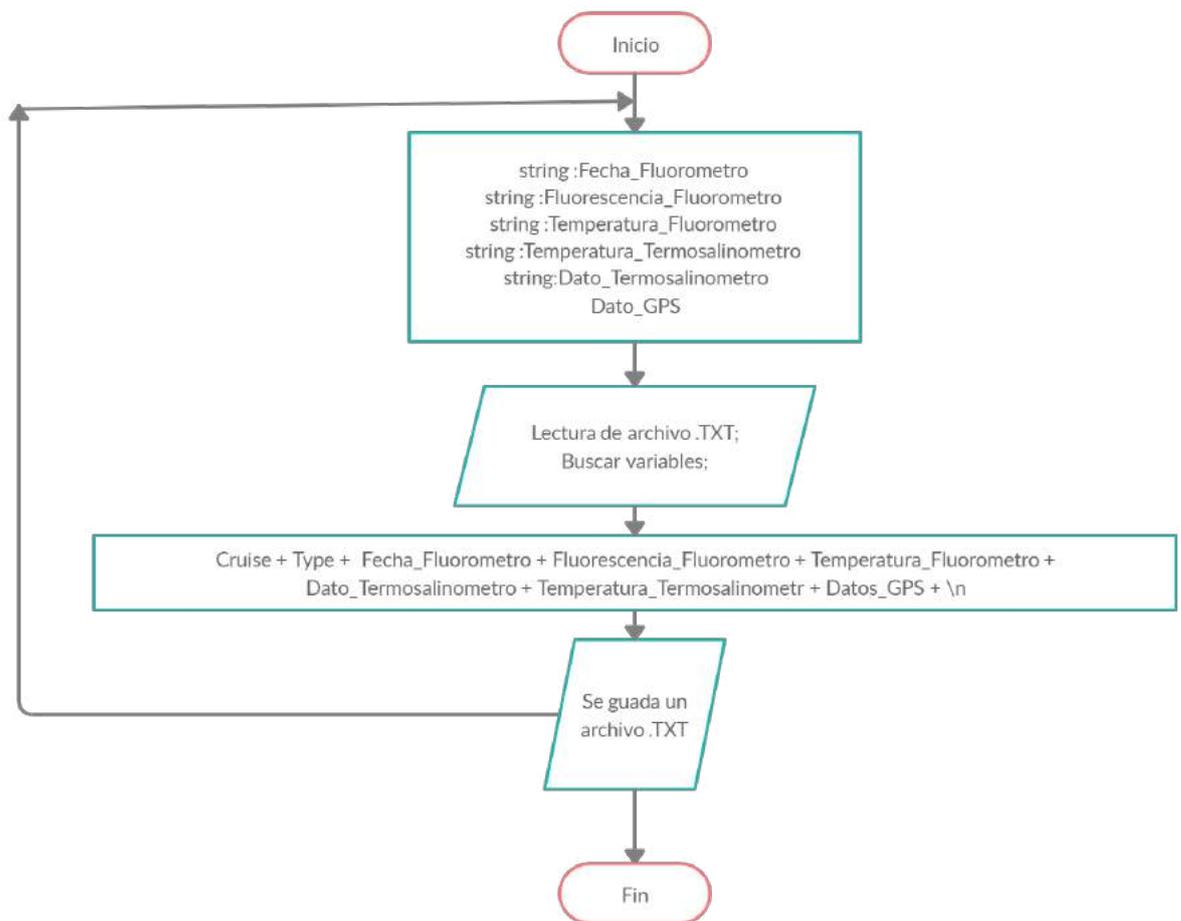


Figura 6.10: Diagrama de Flujo

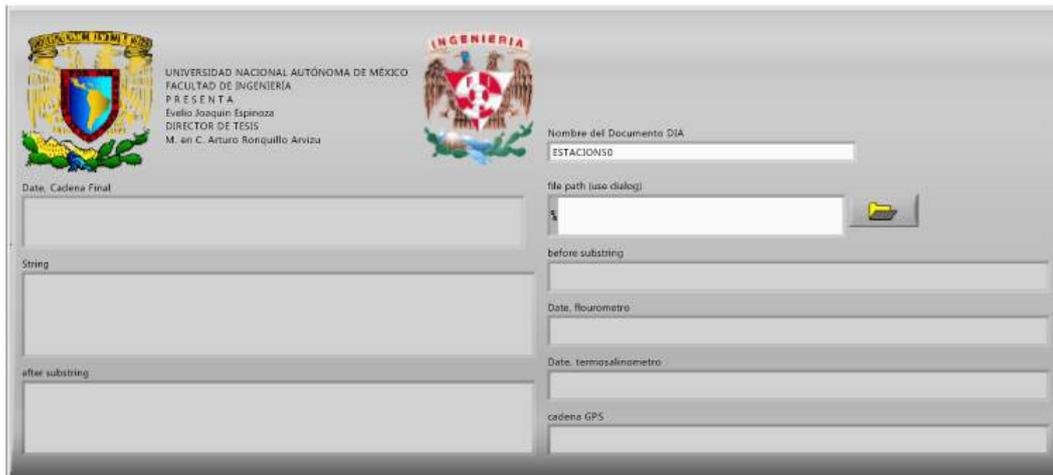


Figura 6.11: Diagrama de procesamiento de datos

Cruise	Type	station	yyyy-mm-ddThh:ss:sss	Chlorophyll m3 [mg/m3]	Teperatura Fluorometro [degC]
Teperatura Fluorometro [degC]	Teperatura Termosalinometro [degC]	salinity [UPS]	Depth [m]	Latitude N	Longitude W

Figura 6.12: Formato de datos para el programa ODV

Para detallar más acerca de los datos en la siguiente sección se describe cada uno.

6.2.1. Formato de Datos para software Ocean Data View (ODV).

- Crucero Tipo
Ejemplo: *SOGOM 4 EN*
- Fecha y hora de registro
Ejemplo:
9/06/18 21:23:191
- Fluorometro
Fluorescencia [URF] Temperatura del Fluorómetro [degC]
Ejemplo:
50 36

- Termosalinómetro
Salinidad, Temperatura del Instrumento Ejemplo:
6.05396 36.5640
- Coordenadas GPS
Latitud Longitud Ejemplo:
2030.1261 09329.8368

Cruise	station	Type	salinity	Depth	Latitude N	Longitude W	Chlorophyll	m3	Temperatura Fluorometro	Temperatura Termosalinometro
1 a 15	8/29/18	TN	10.946	29.4	30.1	36.3	0	20.151239	-96.177108	
21 a 35	9/05/18	TN	2.978	28.7	29.5	36.5	0	20.574743	-92.578442	
20 a 21	9/04/18	TN	3.112	28.9	29.6	36.4	0	20.28504	-92.322749	
20 a 21	9/04/18	TN	3.123	28.9	29.6	36.3	0	20.300648	-92.299727	
20 a 21	9/04/18	TN	3.123	29	29.7	36.4	0	20.238997	-92.374016	
20 a 21	9/04/18	TN	3.151	28.9	29.6	36.4	0	20.278665	-92.330267	
20 a 21	9/04/18	TN	3.195	29	29.7	36.4	0	20.251393	-92.36156	
10 a 59	9/09/18	TN	3.212	29.1	29.8	36.3	0	20.202684	-94.59668	
20 a 21	9/04/18	TN	3.22	29	29.7	36.4	0	20.240747	-92.372285	
21 a 35	9/05/18	TN	3.227	28.7	29.5	36.5	0	20.562211	-92.566696	
20 a 21	9/04/18	TN	3.235	29	29.7	36.4	0	20.261479	-92.350866	
20 a 21	9/04/18	TN	3.265	29	29.7	36.4	0	20.25133	-92.361625	
17	9/09/18	TN	3.27	29.4	30.2	36.6	0	19.574145	-94.534198	
20 a 21	9/04/18	TN	3.278	29	29.7	36.4	0	20.228678	-92.384236	
17	9/09/18	TN	3.279	29.4	30.1	36.6	0	19.596381	-94.589694	
21 a 35	9/05/18	TN	3.281	28.7	29.5	36.5	0	20.578746	-92.581914	
17	9/09/18	TN	3.31	29.3	30.1	36.6	0	19.592853	-94.580441	
17	9/09/18	TN	3.335	29.5	30.2	36.6	0	19.573115	-94.531884	
20 a 21	9/04/18	TN	3.32	28.9	29.6	36.3	0	20.301054	-92.300318	
12 a 15	9/04/18	TN	3.321	29	29.8	36.4	0	19.105997	-93.30844	
20 a 21	9/04/18	TN	3.325	28.9	29.6	36.3	0	20.300928	-92.299845	
17	9/09/18	TN	3.334	29.4	30.2	36.6	0	19.574003	-94.533882	
33 a 23	9/08/18	TN	3.345	29.1	29.8	36.5	0	20.523251	-94.294553	
10 a 59	9/09/18	TN	3.346	29.1	29.8	36.3	0	20.164686	-94.595352	
7 a 4	8/31/18	TN	3.349	29.3	30	36.5	0	18.501185	-94.599367	
17	9/09/18	TN	3.356	29.3	30	36.6	0	19.587455	-94.566788	
20 a 21	9/04/18	TN	3.357	29	29.7	36.4	0	20.233811	-92.379175	
20 a 21	9/04/18	TN	3.362	28.9	29.7	36.4	0	20.2981	-92.30272	
10 a 59	9/09/18	TN	3.367	29	29.8	36.3	0	20.186881	-94.595959	
17	9/09/18	TN	3.367	29	29.7	36.3	0	20.22303	-94.597759	
10 a 59	9/09/18	TN	3.371	29.3	30.1	36.6	0	19.593739	-94.582725	
39 a 40	9/10/18	TN	3.381	29.4	30.2	36.6	0	21.289593	-95.183605	
22 a 19	9/07/18	TN	3.382	29	29.8	36.6	0	20.039754	-93.57378	
21 a 35	9/05/18	TN	3.384	28.7	29.5	36.5	0	20.580676	-92.583535	
7 a 4	8/31/18	TN	3.388	29.4	30.1	36.6	0	18.517376	-94.594547	
17	9/08/18	TN	3.391	29.6	30.3	36.7	0	19.560698	-94.503949	
21 a 35	9/05/18	TN	3.397	28.7	29.5	36.5	0	20.576759	-92.580238	
17	9/09/18	TN	3.404	29.3	30.2	36.6	0	19.591063	-94.575931	
34 a 33	9/07/18	TN	3.408	29.3	30	36.5	0	21.000237	-94.290805	
20 a 21	9/04/18	TN	3.412	29	29.7	36.3	0	20.205435	-92.406771	
7 a 4	8/31/18	TN	3.413	29.3	30	36.6	0	18.510208	-94.596517	
7 a 4	8/31/18	TN	3.435	29.3	30	36.5	0	18.498953	-94.599898	
21 a 35	9/05/18	TN	3.417	28.7	29.5	36.5	0	20.55851	-92.563235	
21 a 35	9/05/18	TN	3.418	28.7	29.5	36.5	0	20.572958	-92.576783	
17	9/09/18	TN	3.418	29.4	30.1	36.6	0	19.578756	-94.544765	
20 a 21	9/04/18	TN	3.419	29	29.7	36.4	0	20.231914	-92.381057	

Figura 6.13: Base De Datos Excel SOGOM4

Al contar con los archivos de estaciones más sus transectos procesados con el formato requerido por ODV se tiene como resultado una base de datos universales de la campaña "SOGOM 4". Así realizado el procesamiento se procedió a realizar los correspondientes mapas con ayuda del software Ocean Data View.

6.3. Ocean Data View (ODV)

Ocean Data View (ODV) es un paquete de software de libre acceso para la exploración interactiva, el análisis y la visualización de conjuntos de datos oceanográficos. Tiene dos algoritmos de cuadrícula de promedio ponderado rápido, así como el avanzado software de cuadrícula DIVA incorporado. DIVA es un software de red desarrollado en la Universidad de Lieja que ofrece

una serie de ventajas sobre los métodos de promedio ponderado integrados en ODV. Permite analizar e interpolar datos de manera óptima, DIVA tiene en cuenta las características de la costa (importante en el análisis ya que el principio de variación se resuelve solo en la región cubierta por el mar.) y la batimetría (profundidades marinas) para estructurar y subdividir el dominio en el que se realiza la estimación. Los cálculos se realizan en una malla de elementos finitos adaptada a los dominios de cuadrícula específicos. Podemos ver que el método de elementos finitos tiene en cuenta: la distancia entre análisis y datos (restricción de observación), la regularidad del análisis (restricción de suavidad), leyes físicas (restricción de comportamiento) [66]. [67].

6.3.1. Mapa de referencia para el análisis

Con el propósito de tener referencia del comportamiento del microorganismo fitoplancton a continuación se presentan un mapa ver figura 6.14 con el comportamiento del microorganismo en el año 2017 que pertenecen a la base de datos de la campaña "Plataformas de observación oceanográfica, línea base, modelos de simulación y escenarios de la capacidad natural de respuesta ante derrames de gran escala en el Golfo de México", las instituciones que participaron para la creación de este material pertenecen al Consorcio de Investigación del Golfo de México (CIGoM): CICESE, BAJAINNOVA, CIDE-SI, CINVESTAV-Mérida, IBt-UNAM, IGeof.UNAM, CCA-UNAM, INECC. Este mapa se realizó con diferentes técnicas de análisis Cuantitativo para determinar la concentración de fitoplancton, esto quiere decir que la cuantificación del fitoplancton es realizada estadísticamente, ya que no es posible contar todos los individuos que se encuentran en la muestra y complementada con datos de fluorescencia con un fluorómetro de laboratorio Trilogy de Trner Desing

En el mapa observamos que la concentración mayor de este microorganismo se encuentra cerca de la línea costera de Veracruz, teniendo mayor concentración en el área que comprende las coordenadas (O 96.7°- E 94.9°/ N 21.5° - S 20°) y sobre el área que comprende las coordenadas (O 96.7°- E 94.9°/ N 23° - S 21.5°) (Límite Oeste - límite Este / límite Norte - límite Sur).

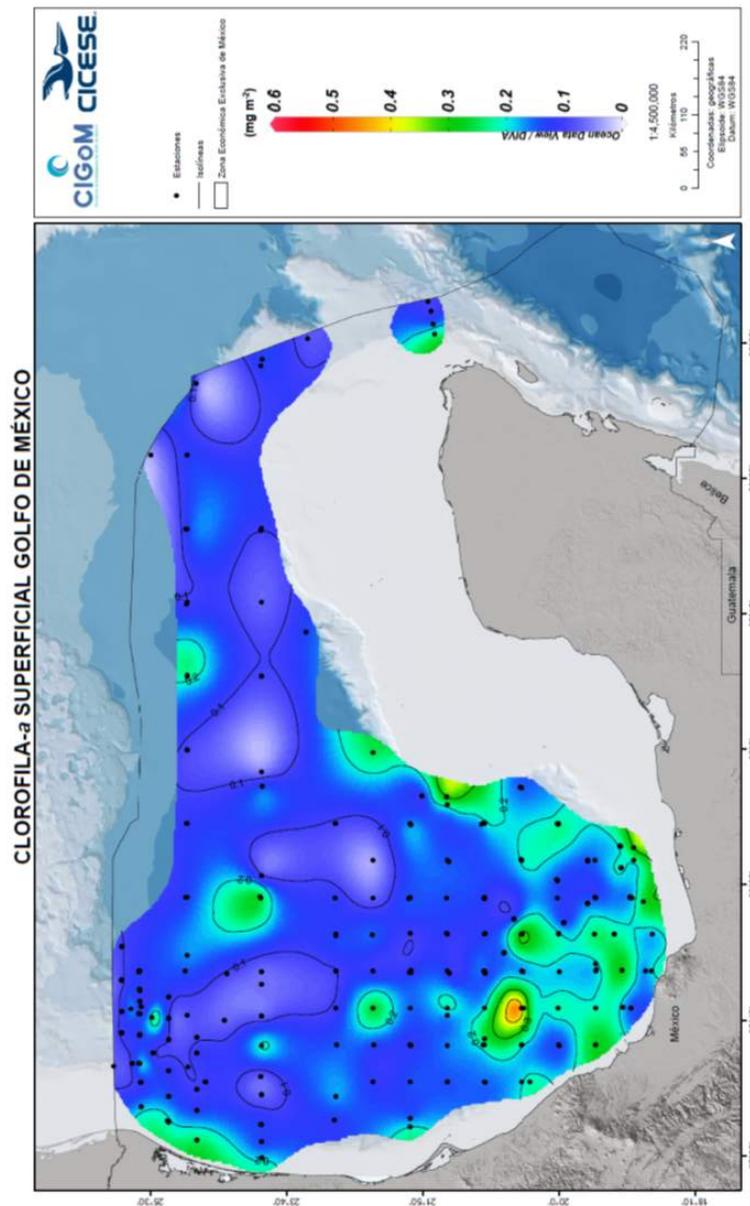


Figura 6.14: CIGoM, CICESE, Mapa de concentración de clorofila a superficial en el Golfo de México

Capítulo 7

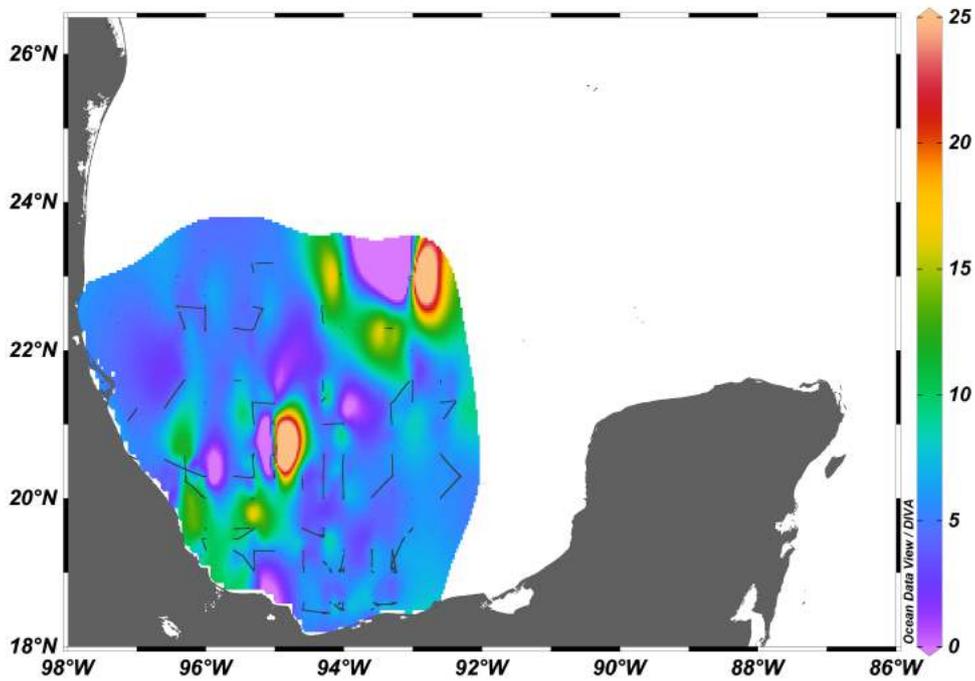
Resultados

7.0.1. Fluorescencia superficial SOGOM 4

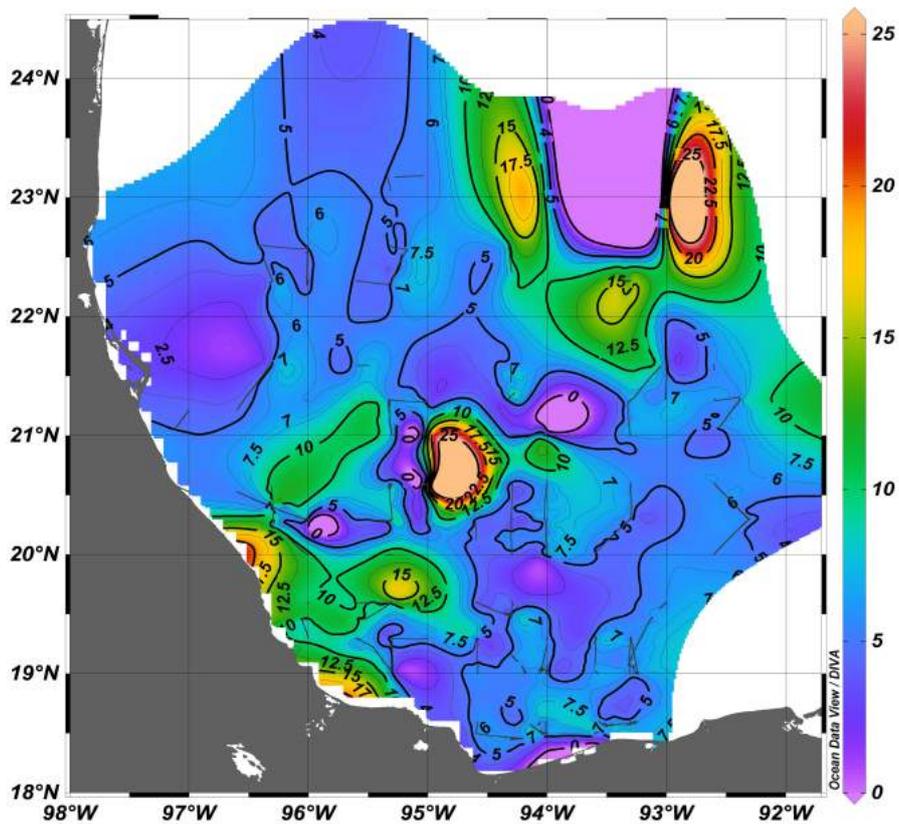
Con la ayuda del programa de procesamiento de datos se obtuvieron 203288 conjuntos de datos que cumplen con el formato mencionado en la sección 6.2.1.

Tras llevar a cabo con ayuda del software ODV el procesamiento de la base de datos se obtuvo como resultado el mapa con la concentración de fluorescencia derivada de la clorofila-a superficial de fitoplancton tal como se muestra en la figura 7.1 (a) cuyo mapa esta delimitado por las coordenadas (O 98° - E 91.7° / N 24° - S 18°), el comportamiento de fluorescencia (RAW) emitida en el golfo de México presentó valores en un intervalo de 0 a 25 [RAW], esto en un rango de 0 como valor mínimo de concentración a 99 [RAW] como valor máximo. Delimitado el mapa 7.1 (a) con las coordenadas (O 98° - E 91.7° / N 24° - S 18°) para un mejor análisis ver figura 7.1 (b) se observa que la concentración mayor de fluorescencia se encuentra registrada en dos regiones con las coordenadas (O 94° - E 92° / N 24° - S 22°) y (O 96° - E 94° / N 22° - S 20°) (Límite Oeste - límite Este / límite Norte - límite Sur), las estaciones que se encuentran dentro de las regiones con alta y/o moderada concentración de fosforescencia se muestran en la tabla 7.1.

El mapa con la concentración de Salinidad se muestra en la figura 7.2 (a), siendo que el comportamiento de salinidad (psu) en el golfo de México presentó valores en un intervalo de 33 a 37.5 [RAW], se observa que la concentración menor de salinidad se encuentra registrada sobre la línea costera.

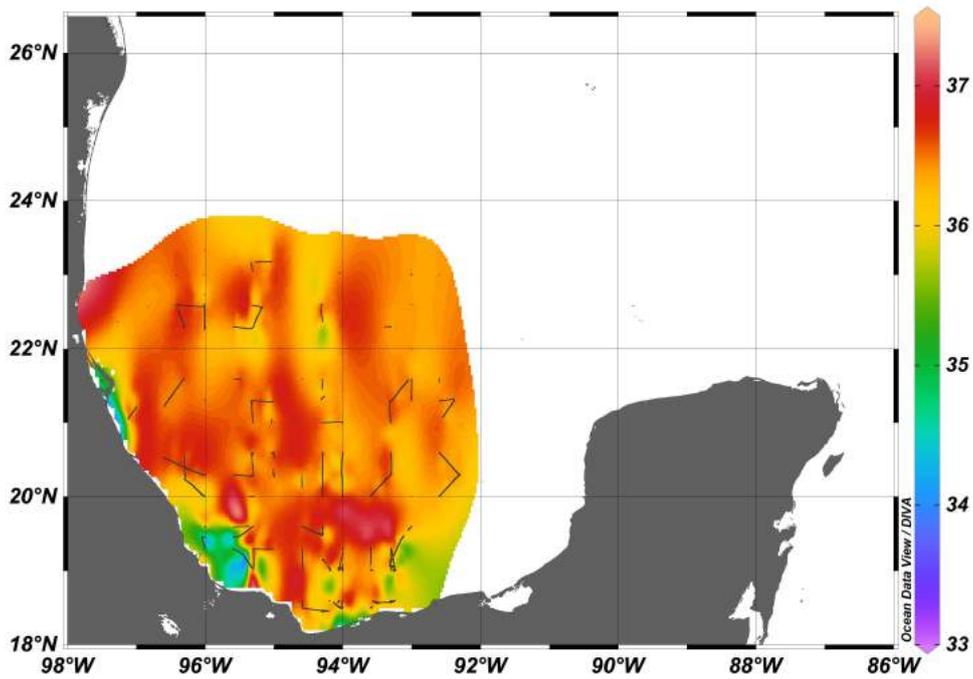


(a) Fluorescencia Mapa de coordenadas(O 98° - E 91.7°/ N 26.2° - S 18°)

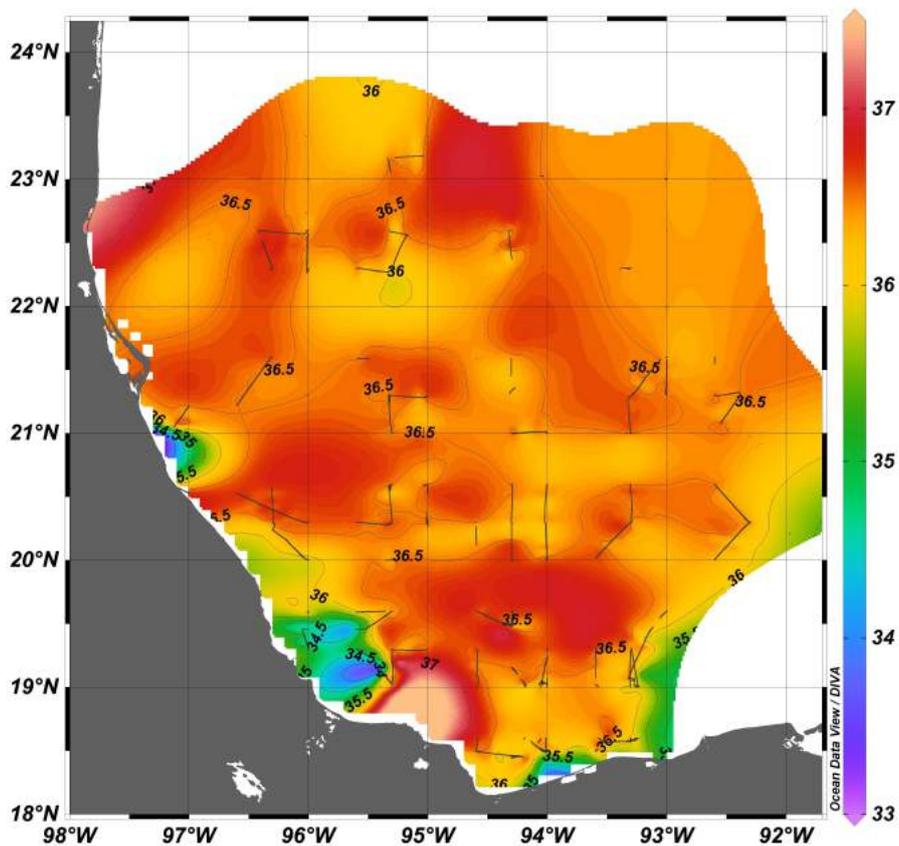


(b) Mapa de coordenadas (O 98° - E 86°/ N 24° - S 18°)

Figura 7.1: Mapa de concentración de fluorescencia emitida por clorofila a superficial en el Golfo de México SOGOM-04



(a) Mapa de coordenadas(O 98° - E 86° / N 26.2° - S 18°)



(b) Mapa de coordenadas (O 98° - E 91.7° / N 24° - S 18°)

Figura 7.2: Mapa de concentración de salinidad superficial en el Golfo de México SOGOM-04

Coordenadas	Estaciones con alta concentración de fluorescencia
(O 96.7°- E 96°/ N 26.5° - S 18.6°)	G44, G45, H50, H51, I57, G46 y J59
(O 95.3°- E 94.2°/ N 21.2° - S 20.1°)	E32, E33, F34 y F34
(O 95°- E 93.9°/ N 24° - S 22°)	A6, B13, C21 y D26
(O 94°- E 93°/ N 23.7° - S 21.5°)	D27
(O 93°- E 92°/ N 24° - S 23°)	A7 y C14

Tabla 7.1: Tabla de coordenadas y mayor Fluorescencia Superficial SOGOM 4.

Capítulo 8

Conclusiones

En esta Tesis se adquirieron datos de fluorescencia emitida por clorofila-a presente en el fitoplancton a lo largo de 63 estaciones y en el transecto de estas en el golfo de México. Como se menciona en el capítulo 1 el fitoplancton es la base principal de las redes tróficas y es el principal productor de oxígeno en la tierra, es indispensable estudiar el comportamiento de la especie Fitoplancton en los ecosistemas, para entender el funcionamiento de los ecosistemas marinos lo cual representa un beneficio, ya que se podría obtener energía ‘limpia’ mediante biocombustibles proveniente de algas [68] [69]

Gracias al correcto manejo de los instrumentos y el buen funcionamiento del software llamado "FLUOROMETRO SOGOM4-1" diseñado en Labview se recabo datos de gran relevancia, así mismo con el software llamado "Programa de procesamiento de Datos SOGOM" se logro concatenar los datos con el formato requerido por el software ODV y así obtener mapas de concentración de fluorescencia emitida por la clorofila a, salinidad y temperatura del instrumento fluorómetro y termosalinómetro, el conjunto de datos forman parte del proyecto de investigación "Plataformas de observación oceanográfica, línea base, modelos de simulación y escenarios de la capacidad natural de respuesta ante derrames de gran escala en el Golfo de México". Con la base de datos se desarrollo mapas de concentración de fitoplancton superficial ver figura 7.1 (a) y (b).

El diseño de los programas realizados para este trabajo se llevó a cabo con lenguaje G en LabView y con la ayuda del software ODV se logró obtener mapas donde se observa el comportamiento de la concentración de la fluorescencia superficial, estos mapas ofrecen un antecedente del estado actual del microorganismo en términos de distribución para conocer el impacto de las actividades humanas como la industria petrolera o derrames de petróleo.

El siguiente paso de la investigación es analizar y caracterizar respecto a la distribución espacial la relación del comportamiento del alga con otros parámetros químicos y biológicos.

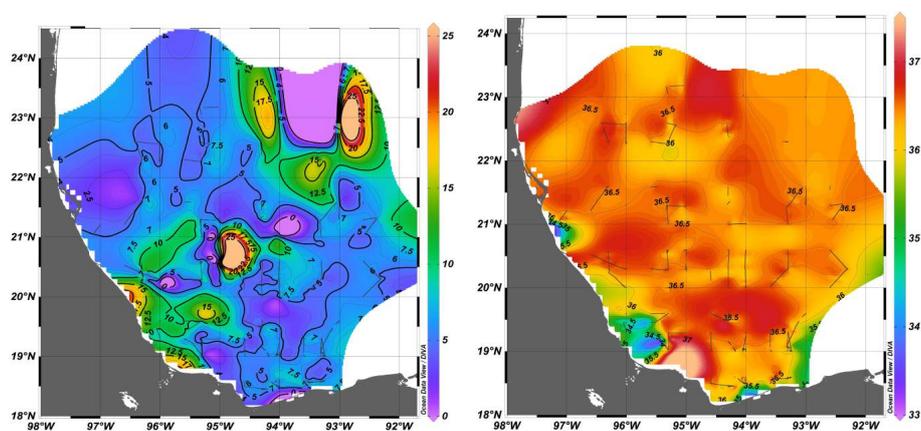
Las limitaciones del proyecto están ligadas a las dimensiones del campo de trabajo, la variedad de ecosistemas y de especies, así mismo de procesos ecológicos y aspectos físicos (hidrografía), movimientos del carbono, de nutrientes, oxígeno o materia orgánica particulada, entre otros. Los procesos marinos determinan cambios constantes, con lo cual se observa un área de oportunidad para el desarrollo de un sistema de monitoreo de agua marina continua en la zona. Tomando como referencia las 63 estaciones de la campaña SOGOM 04, se recomienda la integración de profesionales en Ingeniería Ambiental para el diseño del sistema de monitoreo para la protección del ambiente con la implementación de sistemas tecnológicos.

Se recomienda la utilización de instrumentos para la captura de otros datos variables ambientales y biológicos como el PH marino que como se mencionó en el capítulo 4.4 es una variable que afectan la fluorescencia.

Apéndice

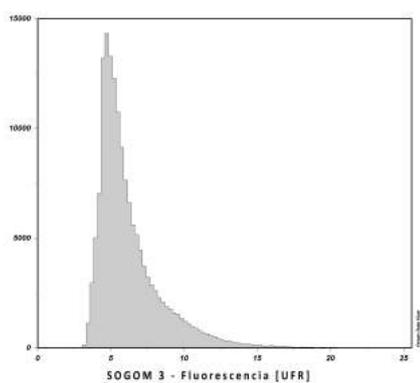
Apéndice A

Mapas SOGOM 4

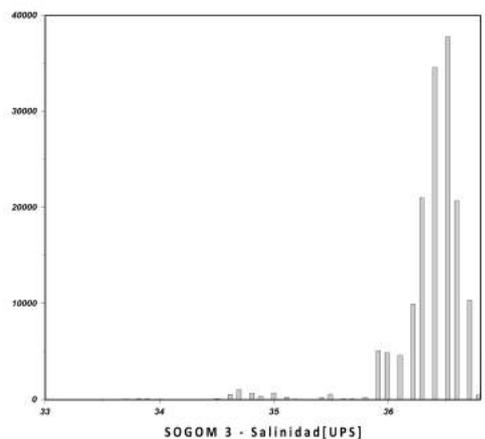


(a) Fluorescencia

(b) Salinidad



(c) Histograma de Fluorescencia



(d) Histograma de Salinidad

Figura A.1: **SOGOM 4** Mapa e histograma de Fluorescencia y Salinidad (Estaciones y Transitos)

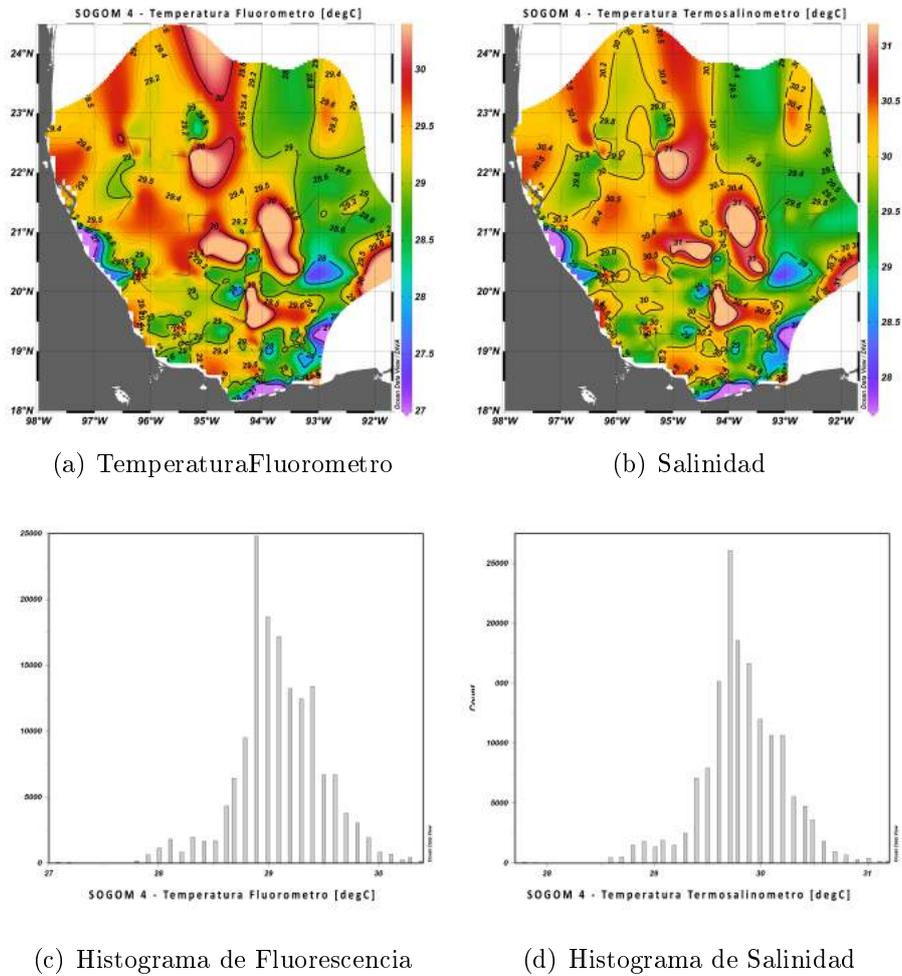
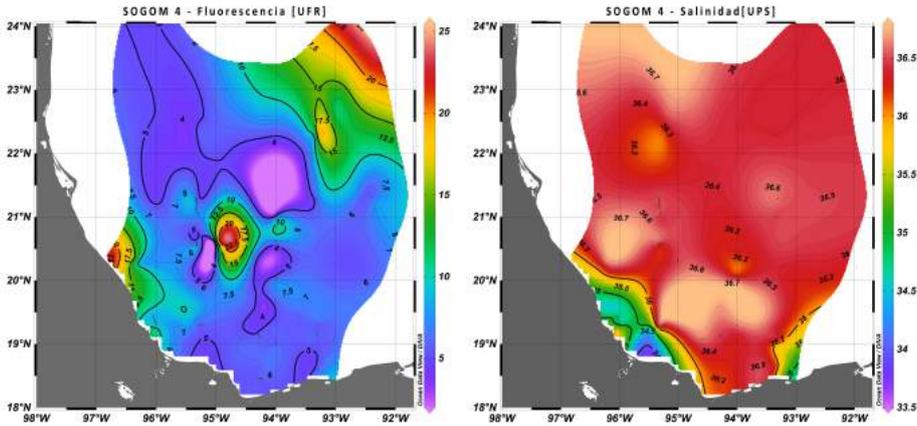
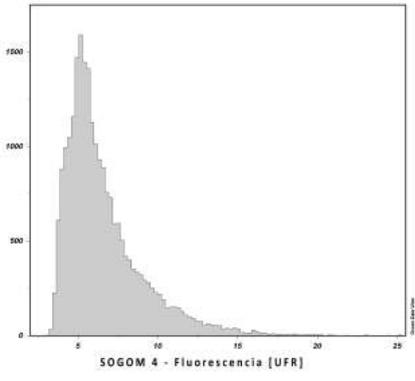


Figura A.2: SOGOM 4 Mapa e histograma de Temperatura de Instrumentos (Estaciones y Transitos)

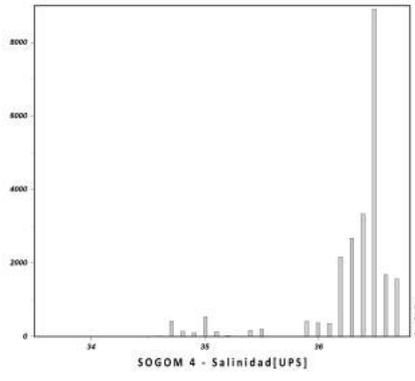


(a) Fluorescencia

(b) Salinidad

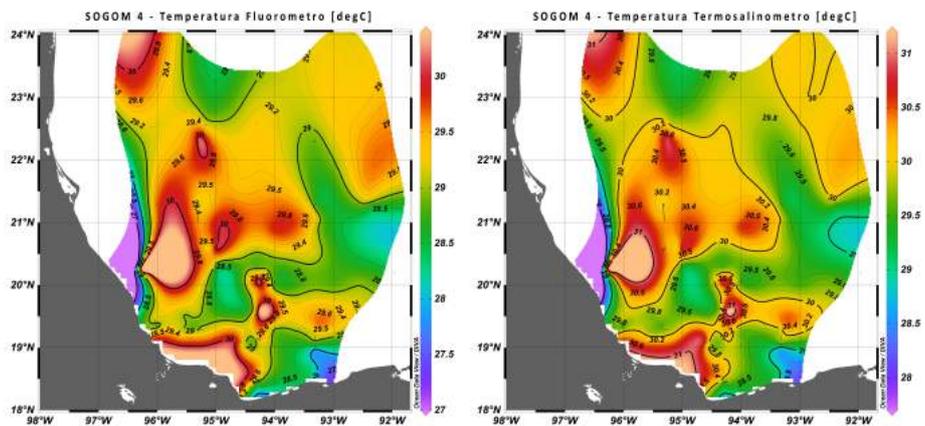


(c) Histograma de Fluorescencia



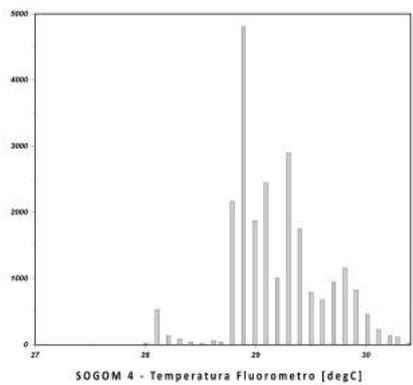
(d) Histograma de Salinidad

Figura A.3: **SOGOM 4** Mapa e histograma de Fluorescencia y Salinidad (Estaciones de Día)

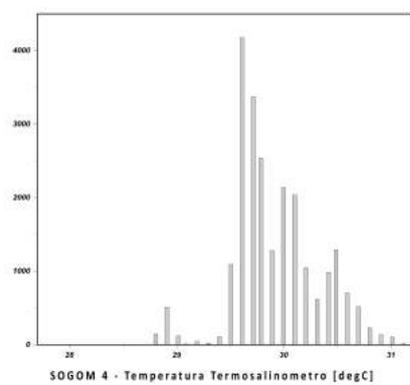


(a) Temperatura Fluorometro

(b) Temperatura Termosalinometro

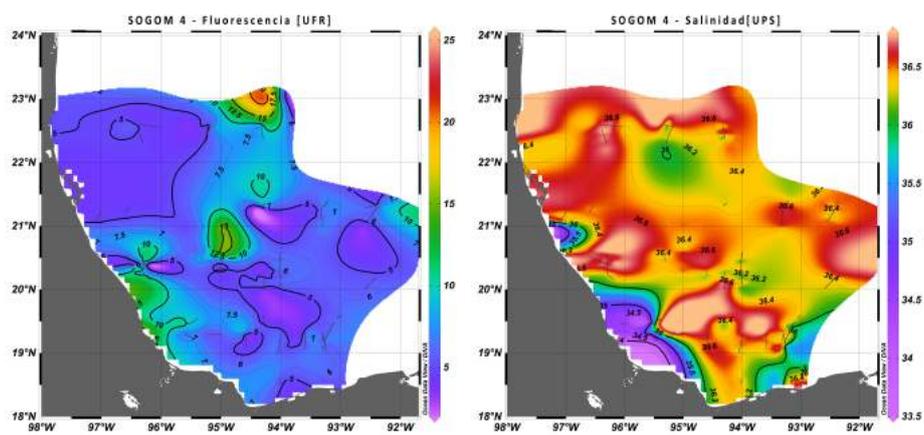


(c) Histograma de Temperatura Fluorometro



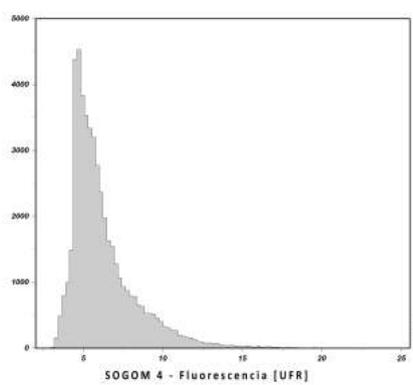
(d) Histograma de Temperatura Termosalinometro

Figura A.4: **SOGOM 4** Mapa e histograma de Temperatura de Instrumentos (Estaciones de Día)

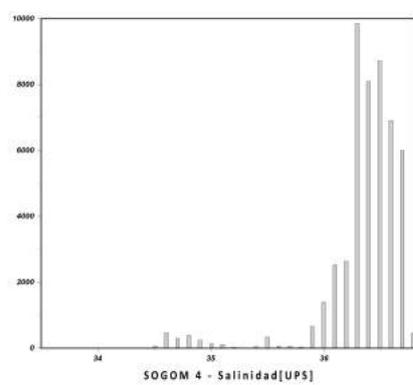


(a) Fluorescencia

(b) Salinidad

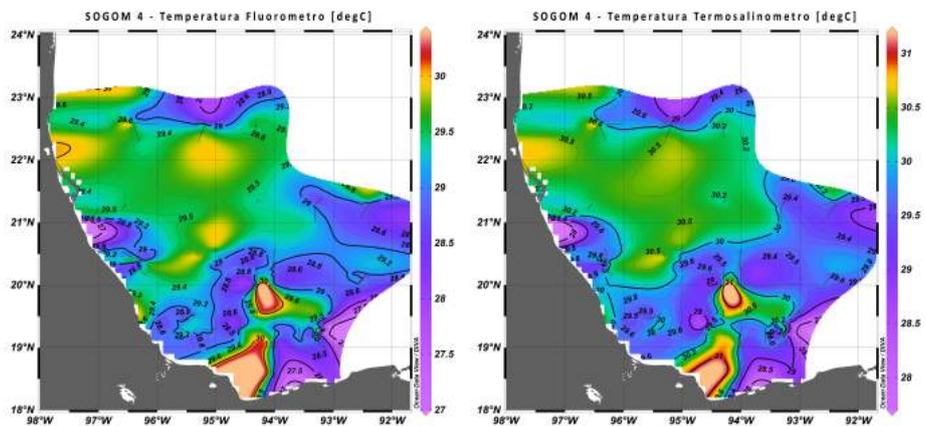


(c) Histograma de Fluorescencia



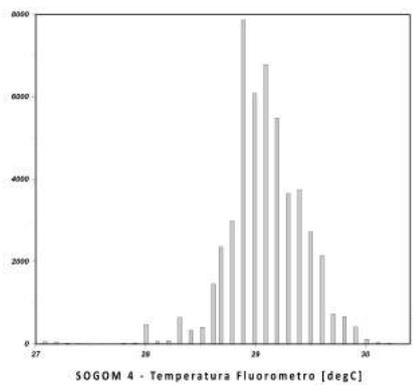
(d) Histograma de Salinidad

Figura A.5: **SOGOM 4** Mapa e histograma de Fluorescencia y Salinidad (Transito de Día)

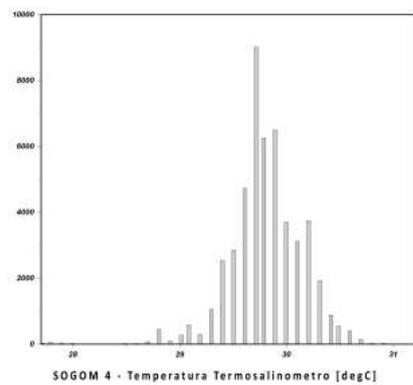


(a) Temperatura Fluorometro

(b) Temperatura Termosalinometro

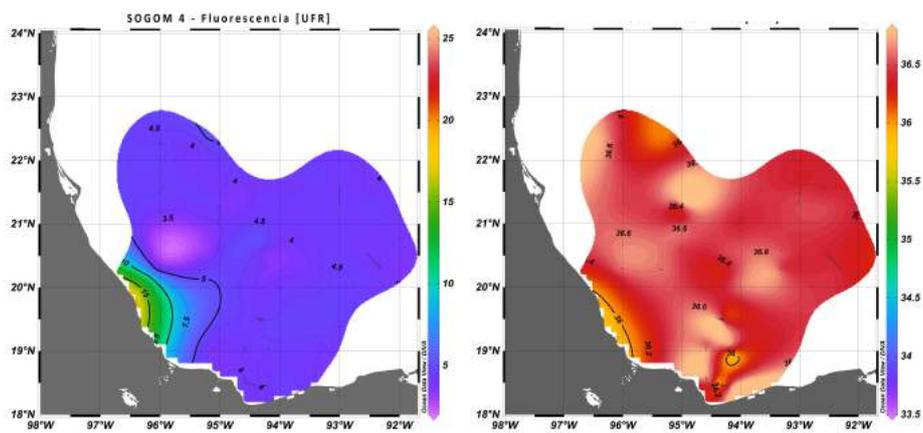


(c) Histograma de Temperatura Fluorometro



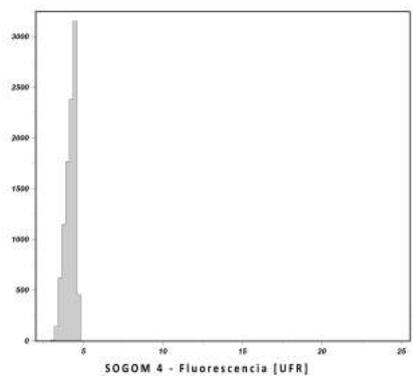
(d) Histograma de Temperatura Termosalinometro

Figura A.6: **SOGOM 4** Mapa e histograma de Temperatura de Instrumentos (Transito de Día)

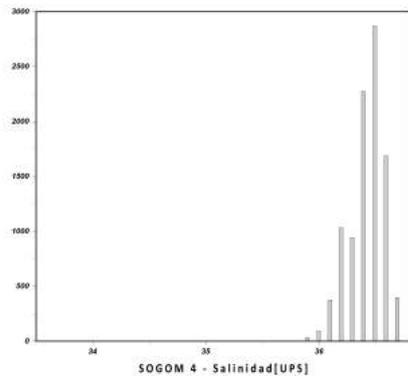


(a) Fluorescencia

(b) Salinidad



(c) Histograma de Fluorescencia



(d) Histograma de Salinidad

Figura A.7: **SOGOM 4** Mapa e histograma de Fluorescencia y Salinidad (Estaciones de Noche)

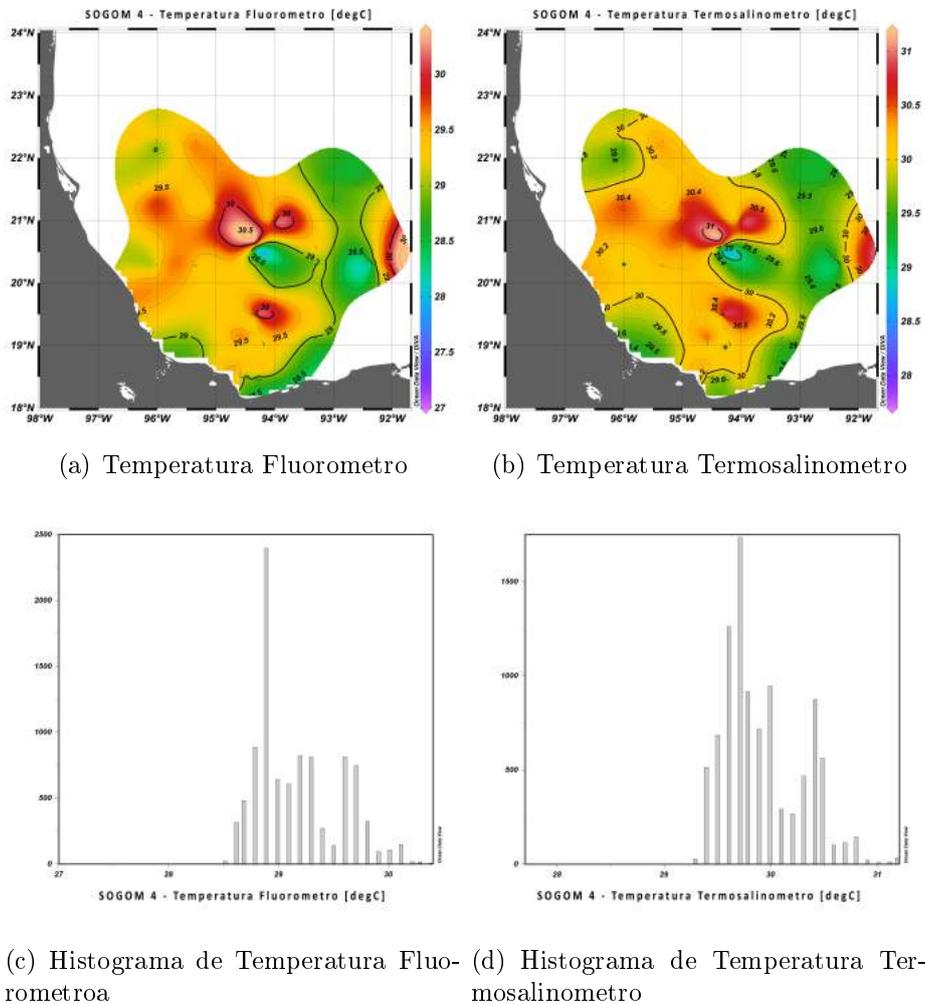


Figura A.8: **SOGOM 4** Mapa e histograma de Temperatura de Instrumentos (Estaciones de Noche)

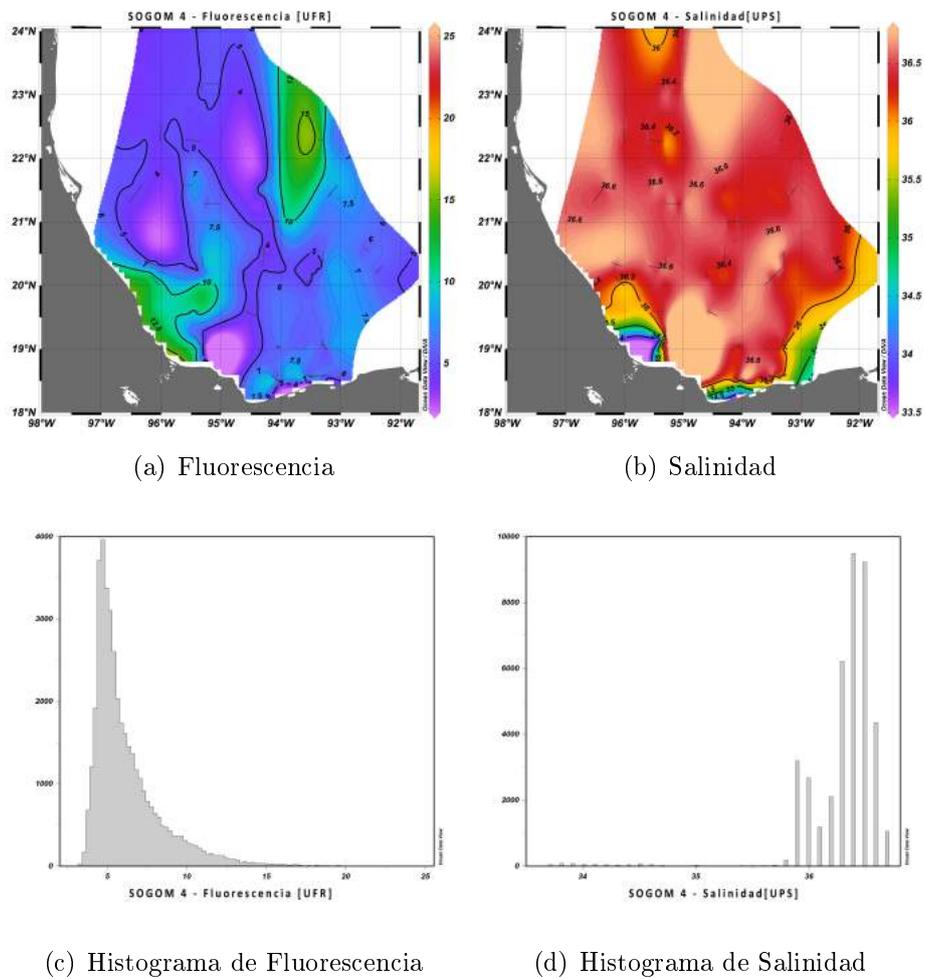
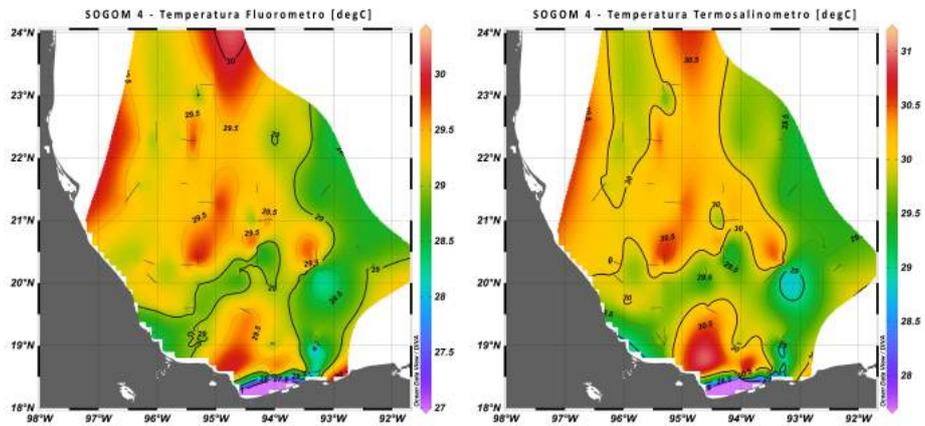
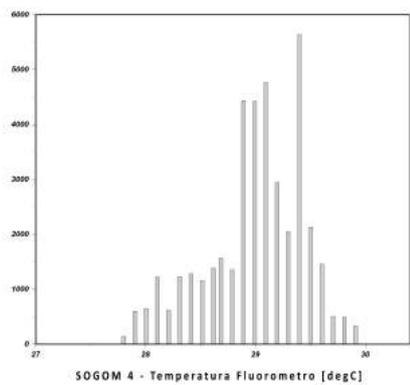


Figura A.9: **SOGOM 4** Mapa e histograma de Fluorescencia y Salinidad (Transito de Noche)

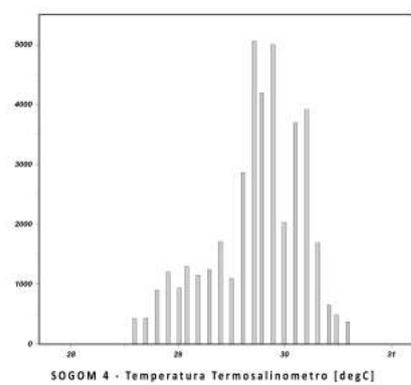


(a) Temperatura Fluorometro

(b) Temperatura Termosalinometro



(c) Histograma de Temperatura Fluorometro



(d) Histograma de Temperatura Termosalinometro

Figura A.10: **SOGOM 4** Mapa e histograma de Temperatura de Instrumentos (Transito de Noche)

Bibliografía

- [1] Centro Nacional de Prevención de Desastres (2019). Pozo Ixtoc-I, el mayor derrame de petróleo en el mar ocurrido en México. Recuperado el 10 de enero de 2020 de <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/pozo-ixtoc-i-el-mayor-derrame-de-petroleo-en-el-mar-ocurrido-en-mexico>
- [2] EFE. (2018, 22 de Octubre). Derrame de petróleo en el Golfo de México, a punto de convertirse en el peor de la historia; lleva 14 años. Vanguardia. Recuperado el 29 de octubre de 2019 de <https://vanguardia.com.mx/articulo/derrame-de-petroleo-en-el-golfo-de-mexico-punto-de-convertirse-en-el-peor-de-la-historia>
- [3] Redacción. (2019, 1 de Marzo). Hidrocarburos los contaminantes del golfo de México. La Jornada. Recuperado el 10 de octubre de 2019 de <https://www.jornada.com.mx/ultimas/sociedad/2019/03/01/hidrocarburos-los-contaminantes-del-golfo-de-mexico-157.html>
- [4] Proyectos. (2019). cigom. Recuperado el 10 de octubre de 2019 de <https://cigom.org/>
- [5] Gaxiola, Castro. Cepeda, Morales. Nájera, Martínez. Espinosa, Carreón. De la Cruz, Orozco. Sosa. Aguirre, Hernández. Biomasa y producción del fitoplancton. Biomasa. Recuperado el 10 de octubre de 2019 de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/642/biomasa.pdf>
- [6] EcuRed. (2019, julio 15). Ambiente Pelágico. Recuperado el 1 julio 29, 2020 en https://www.ecured.cu/index.php?title=Ambiente_Pel%C3%A1gico&oldid=3459673.
- [7] Martínez, M. MOCTEZUMA L. (2006, 30 de mayo) MÉTODOS FÍSICO-QUÍMICOS EN BIOTECNOLOGÍA ESPECTRO FLUORIMETRÍA.

- Recuperado el 1 agosto 2019 en <http://www.ibt.unam.mx/computo/pdfs/met/espectrofluorimetria.pdf>
- [8] López, R. (2019,7 de enero).El fitoplancton, básico para la vida en la Tierra. Gaceta UNAM.
- [9] T. Rodríguez-Ramos , E. Marañón , P. Cermeño.(2015). Marine nano- and microphytoplankton diversity: redrawing global patterns from sampling-standardized data [versión electrónica]. *Glob Ecol. Biogeogr.* 24 , 527 - 538
- [10] Brown, J. H.; Gillooly, J. F.; West, G. B.; Savage, V. M. 2004. Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology*
- [11] Righetti , Vogt, Gruber, Achilleas Psomas2, Zimmermann.(2019).Global pattern of phytoplankton diversity driven by temperature and environmental variability [versión electrónica].*Science Advances*. <https://advances.sciencemag.org/content/5/5/eaau6253>
- [12] Bužančić, Ninčević, Marasović, Kušpilić, Grbec.(2016). Eutrophication influence on phytoplankton community composition in three bays on the eastern Adriatic coast. *Oceanologia*. 302-316 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0078323416300124>
- [13] Hernández, B.(2014,) Biodiversidad de algas planctónicas marinas (Cyanobacteria, Prasinophyceae, Euglenophyta, Chrysophyceae, Dictyochophyceae, Eustigmatophyceae, Parmophyceae, Raphidophyceae, Bacillariophyta, Cryptophyta, Haptophyta, Dinoflagellata) en México [versión electrónica]. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmbiodiv/v85sene/v85senea5.pdf>
- [14] Orduña, M. (2012). PATRONES DE DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DEL FITOPLANCTON NOCIVO EN LA ZONA COSTERA DE TUXPAN VERACRUZ, MÉXICO. Tesis de Maestría. UNIVERSIDAD VERACRUZANA, FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS, CAMPUS TUXPAN <https://www.uv.mx/pozarica/mmemc/files/2012/10/ROSA-ESTELA-ORDUNA-MEDRANO.pdf>
- [15] Vollenweider, R. A. y J. Kerekes.(1982) Eutrophication of waters, monitoring, assesment and control. Final report. OECD Coperative program on monitoring of inland waters (Eutrophication control), Environment Directorate

- [16] Agencia EFE.(2018, 23 octubre).Derrame de petróleo en Golfo de México puede ser uno peores de la historia recuperado de <https://www.efe.com/efe/america/mexico/derrame-de-petroleo-en-golfo-mexico-puede-ser-uno-peores-la-historia/50000545-3788883>
- [17] Servicio de Información y Noticias Científicas. (2018, 17 de diciembre).Derrame de petroleo en Golfo de México daño el sistema sensorial de las rayas. El Universal. <https://www.eluniversal.com.mx/ciencia-y-salud/derrame-de-petroleo-en-golfo-de-mexico-dano-el-sistema-sensorial-de-las-rayas>
- [18] Murawski A. S., Peebles, B. E. Gracia, A. Tunnell, Jr. W. J. Armenteros, M. (2018, 16 de junio). Comparative Abundance, Species Composition, and Demographics of Continental Shelf Fish Assemblages throughout the Gulf of Mexico. *Marine and Coastal Fisheries Dynamics Management and Ecosystem Science*. 10:325–346.b
- [19] McAlice, B.J., (1971) Phytoplankton sampling with the Sedgwick-Rafter cell. *Limnology and Oceanography*. 16: 19-28.
- [20] JRicardo, M. J., Dante M. C., Helena A. V. (2012). Aspectos ecológicos y metodológicos del muestreo, identificación y cuantificación de cianobacterias y microalgas eucariotas. Ed. Reduca (Biología). Serie Microbiología. 5 (5): 110-125
- [21] APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for examination of water and wastewater. 22nd ed. Washington: American Public Health Association; 2012, 1360 pp. ISBN 978-087553-013-0
- [22] Singer, M.(2015, 22 de septiembre). Bis2A 06.3 Photophosphorylation: The light reactions in photosynthesis. Intro to Biology v1.2. <https://cnx.org/contents/rvY0ESm4@1.1:TE8WzeI@3/Bis2A-01-0-Introduction-to-Bis2A-v1-2>
- [23] Neil A. Campbell, Jane B. Reece. (2017). Biología. Buenos Aires, Madrid. Médica Panamericana. 185 - 187.
- [24] La Asociación de Empresas de Energías Renovables. (2017) .¿Qué es la biomasa? <https://www.appa.es/appa-biomasa/que-es-la-biomasa/>
- [25] khanacademy. (2015). Luz y pigmentos fotosintéticos. <https://es.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/>

- the-light-dependent-reactions-of-photosynthesis/a/
light-and-photosynthetic-pigments
- [26] Speer, B.R. (9 de julio de 1997) Photosynthetic pigments (Pigmentos fotosintéticos). En Glosario Ucmp. Extraído de <http://www.ucmp.berkeley.edu/glossary/gloss3/pigments.html>.
- [27] Bullerjahn, G. S. y A. F. Post. (1993). The prochlorophytes: are they more than just chlorophyll a/b-containing cyanobacteria? (Proclorofitas: ¿son más que simples cianobacterias que contienen clorofila a y b?) Crit. Rev. Microbiol. 19(1), 43. <http://dx.doi.org/10.3109/10408419309113522>.
- [28] Gregor, J. Marsálek, B. (2004) Freshwater Phytoplankton Quantification by Chlorophyll a: A Comparative Study of in vitro, in vivo and in situ Methods. Water Res ; 38:517-522
- [29] Mary Ann Clark, Matthew Douglas, Jung Choi (Mar 28, 2018) Photosynthesis. Biology 2e. Recuperado de <https://openstax.org/books/biology-2e/pages/1-introduction>
- [30] Neil A. Campbell, Jane B. Reece. (2017). Biología. Buenos Aires, Madrir. Médica Panamericana. 189.
- [31] Mills, B. (2020). withcolorEsqueleto en 2D de la clorofil, Recuperado de <https://es.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/the-light-dependent-reactions-of-photosynthesis/a/light-and-photosynthetic-pigments>
- [32] Curiosoando (2018, 28 de septiembre). "¿Cuál es la diferencia entre frecuencia y longitud de onda?". Recuperado de <https://curiosoando.com/diferencia-entre-frecuencia-y-longitud-de-onda>
- [33] Chomalí, V.(2017, 8 de marzo) Espectro Electromagnético. Recuperado de <https://unmundointelectualblog.wordpress.com/2017/03/08/espectro-electromagnetico/>
- [34] Ronan, P. (2008). Espectro de las ondas electromagnéticas. Imagen. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:EM_spectrum_es.svg
- [35] Stern, P. D.(2001, 13 de diciembre).(S-5) Ondas y Fotones. Recuperado de <https://pwg.gsfc.nasa.gov/stargaze/Msun5wav.htm>

- [36] Sullivan, M (1997) Precálculo. Funciones exponenciales y logarítmicas. Pearson Educación. (p.p. 300 - 310)
- [37] Rouessac, F. Rouessac, A. (2003) Análisis Químico Métodos y Técnicas Instrumentales modernas Teoría y ejercicios resueltos Mc Graw Hill. (p.p. 196 - 227)
- [38] Martínez, R. R.(2008) Fundamentos teóricos y prácticos de la histoquímica. Editorial CSIC - CSIC Press. (p.p. 190 - 200)
- [39] Jacobs H. A., (1993) Tetrahedron. (p.p. 6.045)
- [40] . Holler, F. J, . Skoog D. A. & Crouch S. R. (2006) Principles Of Instrumental Analysis.
- [41] Baker, N. R. (2008). Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. *Annu. Rev. Plant Biol.* 59(1):89-103.
- [42] Zhenzhu, X. Guangxuan, H. Guangsheng, Z. Yijun, Li (2010, marzo). Photosynthetic potential and its association with lipid peroxidation in response to high temperature at different leaf ages in maize. *Journal of Plant Growth Regulation.* 30(1):41-50.
- [43] Rouessac, F.k.(2010). Análisis Químico Métodos y Técnicas Instrumentales Modernas Teoría y ejercicios resueltos: McGraw-Hill
- [44] Jaramillo, G. C. Ferreira, R. R. Oliva, M. A. (2009). Respuesta fotosintética de diferentes ecotipos de frijol a la radiación y la salinidad. *Corpoica Colombiana de Investigación Agropecuaria.* 10(2):129-140. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/306023244-Respuesta_fotosintetica_de_diferentes_ecotipos_de_frijol_a_la_radiacion_y_la_salinidad
- [45] Ciclo de Calvin. (2020, 10 de julio). Wikipedia, La enciclopedia libre. Fecha de consulta: 2020, agosto 5 desde https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ciclo_de_Calvin&oldid=127620136.
- [46] Gil Ramos, J. M. Andrades Romero, H. Ramos Caro, S. Rodríguez Polo, R. Durán Rodríguez, J. C. Guitard Parra, L. Cuerda López, S. Quintana Quesada, J. M. Gil Martínez, E. Hurtado Peña, J. E. Casado Guillén, D. Beño Mateos, C. P. Alés Pavón, I. Mohedano Ferrer, B. Toro García, R. De la Corte Mogedas, L. Morino Cabello, C. Ternero Pacheco, R. Moreno Pérez, A. Gómez Martínez, D. Del Castillo Torres, L. Prieto Llamas, R. Abreú García, G. (2018) Técnico Especialista en Radiodiagnostico Del Servicio Vasco de Salud-Osakidetza Editorial MAD. España

- [47] Sierra A. I., Gómez R. S., Pérez Q. D., Morante Z. S., (2010) Analisis Instrumental, Volumen1, Editorial Netbiblo. (p.p. 40 - 50)
- [48] Skoog A. D. ,Holler F. J., Crouch R. S.,(2008), Cap 13 Espectroscopía molecular, 6ta Edición , Principios de análisis instrumental,Editorial Cengage Learning Editores
- [49] IZQUIERDO S. M. C , PERAL F. F., DE LA PLAZA P. Á., TROITIÑO N. D., (2013),Interacción de la radiación con átomos y moléculas , EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LOS PRINCIPIOS DE LA QUÍMICA, Editorial UNED.
- [50] Walton F. H., Reyes J., (2005) Análisis químico e instrumental moderno, Editorial Reverté
- [51] Kenneth A. Connors (1981) Cap. Espectroscopia de absorción. Curso de Analisis Farmaceutico: Ensayo Del Medicamento (p.p 200 - 210). Editorial Reverté S.A.
- [52] Harris C. D, (2007),Cap. 14 Fundamentos de espectrofotometría, Análisis químico cuantitativo (3a. ed.), Editorial Reverté.
- [53] Kalstein France. (2019, 7 de febrero). ¿SABÍAS CUALES SON APLICACIONES DEL FLUORÓMETRO?. Recuperado desde https://kalstein.eu/a242/%C2%BFSabias-cuales-son-Aplicaciones-del-fluorometro/article_info.html
- [54] Environmental Protection Agency (EPA).(1997).Method 445.0 - In Vitro Determination of Chlorophyll a and Pheophytin a in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence.(1.2). Recuperado desde: <https://nepis.epa.gov>
- [55] Arrar, J. E. Collins, B. G. (2001, 18 de mayo). In Vitro Determination of Chlorophyll a and Pheophytin a in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence. Recuperado desde <http://docs.turnerdesigns.com/t2/doc/appnotes/998-6000.pdf>
- [56] Yruela Guerrero, I. Alonso Ayala, A. Clavero Agustín, A. Sánchez Fuster, S. Latorre García, A. Jiménez Pérez, M. Sanchez Ruiz, A. Damborenea Castillo, J. Mendoza, J. (2019)El fotosistema II: ensamblaje y función en realidad virtual. Recuperado desde <http://hdl.handle.net/10261/196378>

- [57] Real Academia de Ingeniería.(s. f.) fluorómetro. Recuperado desde <http://diccionario.raing.es/es/lema/fluor%C3%B3metro>
- [58] TURNER DESIGNS, (1999) MODEL 10-AU-005-CE FLUOROMETER USER'S MANUAL.
- [59] Turner Designs, (2018-2020) 10AU Field and Laboratory Fluorometer <https://www.turnerdesigns.com/10au-field-laboratory-fluorometer>
- [60] Samanez, V. I. Rimarachín, C. V. Palma, G. C. Arana, M. J. Ortega, T. H. Correa, R. V. Del Águila, M. H. (2014, diciembre). Métodos de colecta, identificación y análisis de comunidades biológicas: plancton, perifiton, bentos (macroinvertebrados) y necton (peces) en aguas continentales del Perú, Perú.
- [61] Oficina de Coordinación Nacional de Posicionamiento, Navegación, y Cronometría por Satélite (s.f.). Sistema de Posicionamiento Global: Información oficial del Gobierno de los Estados Unidos relativa al Sistema de Posicionamiento Global y temas afines <https://www.gps.gov/spanish.php>
- [62] Serra, J. M.(2011, 12 de octubre).Que es el standar NMEA. Informática a bordo q. Recuperado de <https://www.informaticaabordo.com/2011/10/%c2%bfque-es-el-standar-nmea/>
- [63] GPS information (s.f.). NMEA data. Recuperado desde <http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm>
- [64] Real Academia de Ingeniería. (s.f).termosalinógrafo. Recuperado desde <http://diccionario.raing.es>,Real Academia De Ingeniería, <http://diccionario.raing.es/es/lema/termosalin%C3%B3grafo>
- [65] Sea-Bird Electronics, Inc. (2000, 30 de agosto).User's Manual: SBE 45 MicroTSG Thermosalinograph .Recuperado desde: https://www.comm-tec.com/prods/mfgrs/SBE/manuals_pdf/SBE45_003.pdf
- [66] GeoHydrodynamics and Environment Research (2019 , 17 de septiembre). DIVA recuperado desde: <http://modb.oce.ulg.ac.be/mediawiki/index.php/DIVA>
- [67] Ocean Data View (s. f.) Home. Fecha de consulta Junio 03 2020. Recuperado desde:<https://odv.awi.de/>

- [68] Duarte M. C., (2010) Capitulo 3 la humanidad y los oceanos. Una relacion a lo largo de los tiempos, Océano: el secreto del planeta Tierra, CSIC .
- [69] Guerrero R., Marrero G., Martínez-Duart M. J. Puch A. L.,(2010), Bio-combustibles líquidos: Situación actual y oportunidades de futuro para España, Editorial Fundación Ideas.