

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES CON ÉNFASIS EN GESTIÓN AMBIENTAL

ATENUACIÓN DE LA LUZ SOLAR EN EL ECOSISTEMA ACUÁTICO DEL LAGO DE ATITLÁN
TESIS DE GRADO

JOAQUIN EMILIO ARANGO ARAGON
CARNET 10576-09

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, FEBRERO DE 2018
CAMPUS CENTRAL

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES CON ÉNFASIS EN GESTIÓN AMBIENTAL

ATENUACIÓN DE LA LUZ SOLAR EN EL ECOSISTEMA ACUÁTICO DEL LAGO DE ATITLÁN

TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

POR
JOAQUIN EMILIO ARANGO ARAGON

PREVIO A CONFERÍRSELE

EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL EN EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADO

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, FEBRERO DE 2018
CAMPUS CENTRAL

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

RECTOR: P. MARCO TULIO MARTINEZ SALAZAR, S. J.
VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO
VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS
SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

DECANA: LIC. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ
SECRETARIO: MGTR. LUIS MOISES PEÑATE MUNGUÍA
DIRECTOR DE CARRERA: MGTR. JULIO ROBERTO GARCÍA MORÁN

NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

LIC. MANUEL DE JESUS IXQUIAC CABRERA

TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN

MGTR. NADIA MIJANGOS LÓPEZ

MGTR. VIRGINIA MOSQUERA SALLES

ING. PAMELA ANDREA ELIZABETH CAMARERO BARREDA DE QUIÑONEZ

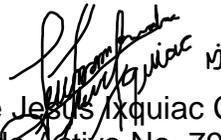
Guatemala, 07 de febrero de 2018

Honorable Consejo
Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas
Presente

Estimados miembros del Consejo:

Por este medio hago constar que he asesorado el trabajo de graduación del estudiante Joaquín Emilio Arango Aragón, carné 1057609, titulado: "Atenuación de la luz solar en el ecosistema acuático del Lago de Atitlán", el cual considero que cumple con los requisitos establecidos por la facultad para ser aprobado, previo a su autorización de impresión.

Atentamente,



Lic. Manuel de Jesús Xquiac Cabrera
Colegiado Activo No. 796



Universidad
Rafael Landívar

Tradición Jesuita en Guatemala

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
No. 06870-2018

Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado del estudiante JOAQUIN EMILIO ARANGO ARAGON, Carnet 10576-09 en la carrera LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES CON ÉNFASIS EN GESTIÓN AMBIENTAL, del Campus Central, que consta en el Acta No. 066-2018 de fecha 26 de enero de 2018, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

ATENUACIÓN DE LA LUZ SOLAR EN EL ECOSISTEMA ACUÁTICO DEL LAGO DE ATITLÁN

Previo a conferírsele el título de INGENIERO AMBIENTAL en el grado académico de LICENCIADO.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 7 días del mes de febrero del año 2018.

MGTR. LUIS MOISES PEÑATE MUNGUÍA, SECRETARIO
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
Universidad Rafael Landívar



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la luz, el agua, el lago de Atitlán y por todos los sucesos y procesos que permiten que exista la vida, también por brindarme salud, y todo lo necesario para concluir con este proyecto.

Especialmente agradezco a mi madre quién ha sido siempre mi apoyo, mi aliento, y mi inspiración para cumplir mis metas y objetivos. Agradezco a mi padre, quién ha luchado a mi lado y ha sido incondicional todos los días de mi vida, agradezco su ejemplo, su esfuerzo, y su fe. Gracias a mi mama Vero por sus sabios consejos y por ser mi sustento. Gracias a mi hermano Erick por ser mi mano derecha y brindarme su amistad y apoyo siempre. Gracias también a mi hermana Estefana por su confianza y apoyo. Gracias a mi Tío Erick por los aleccionamientos y consejos que siempre me ha brindado. Y agradezco a mi novia Elisandra por ser siempre una ayuda idónea en mi vida.

Gracias a mis ángeles allá en el cielo que siempre me cuidan e interceden por mí: Papa Quincho, Mama Maty y Papa Milo.

Gracias a AMSCLAE que me permitió trabajar en su institución durante todo este tiempo. Especiales gracias al equipo técnico de investigación, Licda. Fátima Reyes, Licda. Cristina Rendón y Licda. Mayarí Barreno quienes fueron siempre un soporte incondicional para mí y son una esperanza para el lago de Atitlán.

Gracias al proyecto Expedición Atitlán que fue en donde surgió este proyecto. Especiales gracias a la Dra. Margaret Dix quien siempre es un pilar de la ciencia y la protección de los recursos naturales en Guatemala y quien me brindó su apoyo. Gracias a Dr. Kevin Rose que me introdujo el tema de la atenuación de luz en el agua y con quien surgió el título de mi investigación. Gracias a la Dra. Eliska Rejmánková y al Dr. Sudeep Chandra quienes lideraron la expedición Atitlán con mucho empeño y quienes a pesar de ser de otras nacionalidades han dedicado tiempo y amor para salvaguardar un lugar tan bello y mágico, el lago de Atitlán. Gracias al resto del equipo de Expedición Atitlán.

Infinitas gracias a mi gran amigo y maestro Lic. Miguel Ángel Echeverría a quien estimo y admiro por sus capacidades intelectuales y su filantropía, gracias por su ayuda en mi investigación.

Gracias a mi asesor Lic. Manuel Ixquiac quien me apoyó y asesoró en este proyecto y quien además me introdujo en la materia de la limnología y oceanografía.

DEDICATORIA

Dedicada a Eli.

A ti.

When I walk away I see the moments

When I walk away I see the moments

And it's all because of you girl, the water
and the sun

The sunshine in your eyes, attenuating
my life

When I drive away I see the moments

When I drive away I see the moments

And it's all because of you girl, the water
and the sun

The sunlight in your eyes, attenuate in
my life

When I fly away I feel the moments

When I fly away I feel the moments

And it's all because of you girl, the water
and the sun

The sunshine in your eyes, attenuating
my life

When I sail away I see the moments

When I sail away I see the moments

And it's all because of you girl, the water
and the sun

The sunlight in your eyes, attenuate in
my life ...

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	i
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	3
2.1 Luz solar.....	3
2.1.1 Interacción de la luz con la materia.....	5
2.1.2 Propiedades ópticas del agua.....	8
2.1.3 Dispersión de la luz por las partículas de agua.....	8
2.1.4 Procesos biológicos y la luz solar	9
2.2 Atenuación de la luz en ecosistemas acuáticos	10
2.3 Zona fótica	14
2.4 Lago de Atitlán	16
2.4.1 Transparencia del agua en el lago de Atitlán	17
2.4.2 Atenuación de la luz en el lago de Atitlán	17
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
3.1 Definición del problema y justificación del trabajo	19
IV. OBJETIVOS.....	22
4.1 Objetivo general:	22
4.2 Objetivos específicos	22
V. METODOLOGÍA.....	23
5.1 Localización del estudio	23
5.2 Material experimental	24
5.3 Factor a estudiar	24
5.4 Unidad Experimental	24

5.5 Esquematización del experimento (Croquis de campo)	25
5.6 Manejo del experimento	25
5.6.1. Muestreo	25
5.6.2 Realización de las mediciones	26
5.6.3 Obtención de información	29
5.6.4 Toma de datos de campo	29
5.7 Análisis de la información.....	30
5.8 Tipo de investigación.....	31
5.9 Instrumentos, equipo y software.....	31
VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
VIII. CONCLUSIONES.....	53
IX. RECOMENDACIONES.....	55
X. BIBLIOGRAFIA.....	56
ANEXOS.....	59

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Espectro electromagnético	3
Figura 2. Absorción y emisión de la luz	6
Figura 3. Dispersión elástica e inelástica de la luz	7
Figura 4. Nivel de luz en lagos con diferentes características de claridad	12
Figura 5. Penetración de la luz en el agua	13
Figura 6. Disco Secchi y la medición en lagos claros y turbios	15
Figura 7. Atenuación de la luz en punto Weiss G, Lago de Atitlán junio 2013	18
Figura 8. Batimetría del Lago de Atitlán	24
Figura 9. Sitios de muestreo en el Lago de Atitlán	25
Figura 10. Estabilización de la sonda multiparamétrica que mide PAR.....	27
Figura 11. Introducción de la sonda multiparamétrica en el agua	27
Figura 12. Observación de los resultados en el medidor multiparamétrico	28
Figura 13. Medición con el disco Secchi	28
Figura 14. Sonda multiparamétrica para medir PAR	29
Figura 15. Software MAPLEsoft TM	30
Figura 16. Comportamiento de PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) y la profundidad en el punto WD en septiembre de 2014.....	32
Figura 17. Correlación de las medidas de profundidad con el disco Secchi y PAR.....	33
Figura 18. Correlación de las medidas de profundidad con el disco Secchi y PAR para la época lluviosa.....	34
Figura 19. Correlación de las medidas de profundidad con el disco Secchi y PAR para la época seca	35
Figura 20. Zona fótica en el ciclo anual de mayo 2014 a abril 2015.....	37
Figura 21. Promedio zona fótica del ciclo anual mayo 2014 a abril 2015 (metros).....	37

Figura 22. Media móvil en WG durante el ciclo de mayo 2014 a abril 2015	39
Figura 23. Predicción con un alcance de 2, punto WG.....	40
Figura 24. Predicción con un alcance de 3, punto WG.....	40
Figura 25. Predicción con un alcance de 4, punto WG.....	41
Figura 26. Predicción con un alcance de 5, punto WG.....	41
Figura 27. Predicción con un alcance de 6, punto WG.....	42
Figura 28. Predicción con un alcance de 7, punto WG.....	42
Figura 29. Predicción con un alcance de 8, punto WG.....	43
Figura 30. Predicción con un alcance de 9, punto WG.....	43
Figura 31. Predicción con un alcance de 10, punto WG.....	44
Figura 32. Predicción con un alcance de 11, punto WC.....	44
Figura 33. Medidas móviles de 2 a 11 en el punto WG	45
Figura 34. Predicciones de 2 a 10 en el punto WG	46
Figura 35. Media móvil para el punto WC	46
Figura 36. Medias móviles de 2 a 10 para el punto WC	47
Figura 37. Predicciones de 2 a 10 en el punto WC	47
Figura 38. Valores promedio de la zona fótica por punto de muestreo de mayo 2014 a abril 2015, en el Lago de Atitlán.	50
Figura 39 a - 39 i. Valores promedio de zona fótica (m) mensuales por punto de muestreo en el Lago de Atitlán.	52
Figura 40. Hoja de campo utilizada en los monitoreos en el lago de Atitlán.....	59
Figura 41. Especificaciones técnicas sonda multiparamétrica Hydrolab OTT DS5	64
Figura 42. Memoria de cálculo y comandos para el cálculo de predicciones en el software MAPLEsoft ®	68
Figura 43. Fórmula matemática simplificada para el cálculo de K_d	68
Figura 44. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época lluviosa, mayo 2014	69

Figura 45. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época lluviosa, junio 2014	71
Figura 46. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época lluviosa, julio 2014	72
Figura 47. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época lluviosa, agosto 2014.....	73
Figura 48. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época lluviosa, septiembre 2014.....	75
Figura 49. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época lluviosa, octubre 2014.....	76
Figura 50. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época seca, noviembre 2014.....	78
Figura 51. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época seca, diciembre 2014	79
Figura 52. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época seca, enero 2015	80
Figura 53. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época seca, febrero 2015	81
Figura 54. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época seca, marzo 2015	83
Figura 55. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época seca, abril 2015	84

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Datos generales del lago de Atitlán	23
Cuadro 2. Ubicación de los puntos de muestreo	26
Cuadro 3. Profundidad de la zona fótica (m)	36
Cuadro 4. Factor de decaimiento K_d o tasa porcentual continua	48
Cuadro 5. Comparación de la profundidad Secchi y la zona fótica	60
Cuadro 6. Datos de profundidad PAR y la profundidad en metros para la correlación en el punto W14, mayo 2014.....	63

ATENUACIÓN DE LA LUZ SOLAR EN EL ECOSISTEMA ACUÁTICO DEL LAGO DE ATITLÁN

RESUMEN

El lago de Atitlán enfrenta una serie de problemas ambientales que deben ser estudiados para poder entender la situación del lago. El estudio del comportamiento de la luz solar está relacionado con otras investigaciones, por ejemplo: el estudio de clorofila, la creciente contaminación del agua y los recientes afloramientos de cianobacteria que afectan el estado trófico del lago, por esto es preciso generar la información sobre la atenuación de luz solar y el funcionamiento de ésta en el ecosistema acuático de Atitlán. Debido a esto se estudió y se analizó el comportamiento de la atenuación de la radiación fotosintética activa (PAR), delimitando la zona fótica en ocho sitios de muestreo analizados mensualmente en el lago de Atitlán entre mayo de 2014 y abril de 2015, concluyendo que la luz solar decayó hasta llegar al 1% de la intensidad superficial antes de alcanzar los 30 metros de profundidad. Así mismo se estableció la relación entre las medidas de profundidad del disco Secchi y la profundidad PAR muestreadas con la sonda multiparamétrica y se propuso la metodología para realizar los modelos matemáticos de predicción que simulan el comportamiento de la atenuación difusa utilizando el software MAPLEsoft™ y SURFER® para graficar los resultados. Adicionalmente se obtuvo la correlación entre las mediciones del disco Secchi y PAR, que debido a la escasa cantidad de datos tomados (que corresponden únicamente a un año) y en el estado inicial de este estudio no se obtuvo una alta correlación. Sin embargo esta correlación podría aumentar al introducir más información, obteniendo un modelo con mayor correlación. Finalmente se obtuvieron los valores de decaimiento K_d , característica específica de la atenuación de la luz para el lago de Atitlán. Basado en el promedio la profundidad de la zona fótica y el coeficiente de atenuación difusa K_d obtenidos, este ecosistema acuático puede ser catalogado como un lago mesotrófico o típico.

I. INTRODUCCIÓN

El lago de Atitlán enfrenta una serie de problemas que deben ser estudiados para poder entender la situación del lago. El estudio del comportamiento de la luz solar está relacionado con otras investigaciones que se realizan actualmente como por ejemplo el estudio de niveles de clorofila, el afloramiento de cianobacteria, estudios de calidad del agua entre otros, relacionados con la contaminación, por lo que es preciso generar la información sobre de la atenuación de luz solar y de esta forma tener una visión más integral sobre el funcionamiento de este ecosistema acuático.

Es imprescindible simular el comportamiento de la luz y de otros parámetros físicos y químicos para establecer la relación existente entre ellos, de esta manera se puede tener una mejor idea de lo que podría enfrentar este ecosistema en el futuro. Debido a esto se generó una serie de modelos matemáticos capaces de simular la actividad de la radiación incidente en el lago de Atitlán.

Generar información científica es una necesidad en cualquier ecosistema para poder entender el funcionamiento de este y realizar actividades que permitan el manejo adecuado del sistema natural estudiado, por lo que el lago de Atitlán requiere investigaciones y proyectos que amplíen el conocimiento técnico y científico ya que es una fuente invaluable de agua dulce que se debe preservar de manera eficiente.

La información se generó utilizando herramientas y softwares que permitieron medir la intensidad de luz a diferentes profundidades (desde 0 de 200 metros) en distintos sitios del lago, entre ellos el sitio más profundo, identificado como Weiss G, las entradas de los ríos principales que son el Quiscab y San Francisco, así como otros sitios localizados en base a la cercanía de los pueblos asentados en las orillas del lago, la información obtenida es clave para tener una visión amplia del comportamiento de la luz en el lago de Atitlán, ya que ésta y otros factores abióticos se relacionan directamente con parámetros bióticos del ecosistema.

La absorción y la atenuación de la luz en la columna de agua son factores importantes ya que controlan medidas como la temperatura, la actividad fotosintética y estos están relacionados también con procesos de estratificación, concentración de gases y los procesos biogeoquímicos. La atenuación de la luz es insustituible para la cadena trófica y para otros procesos biológicos en el lago.

Debido a lo anterior, es necesario conocer o ampliar la comprensión sobre la luz solar y su comportamiento en el lago de Atitlán ya que se genera una serie de nuevas oportunidades para estudiar temas que no han sido objeto de estudio y que pueden brindar información valiosa para el adecuado manejo de este recurso.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Luz solar

El estudio de la luz es fundamental ya que la mayor parte de la vida en el planeta depende de ella, sea directa o indirectamente. La luz visible representa una pequeña porción de un amplio espectro continuo de radiación llamado espectro electromagnético. En un extremo del espectro se encuentran los rayos gamma con longitudes de onda muy cortas cuya medida es en nanómetros que es la millonésima parte de un metro y el otro extremo se encuentran las ondas de radio con longitudes de onda tan grandes que pueden medirse en kilómetros. El espectro visible es la porción del espectro electromagnético que va de 380 nm a 760 nm, y que el ser humano es capaz de ver. El espectro visible incluye todos los colores del arco iris: la luz roja es la de mayor longitud y la morada es la de menor longitud tal como se ve en la Figura 1.

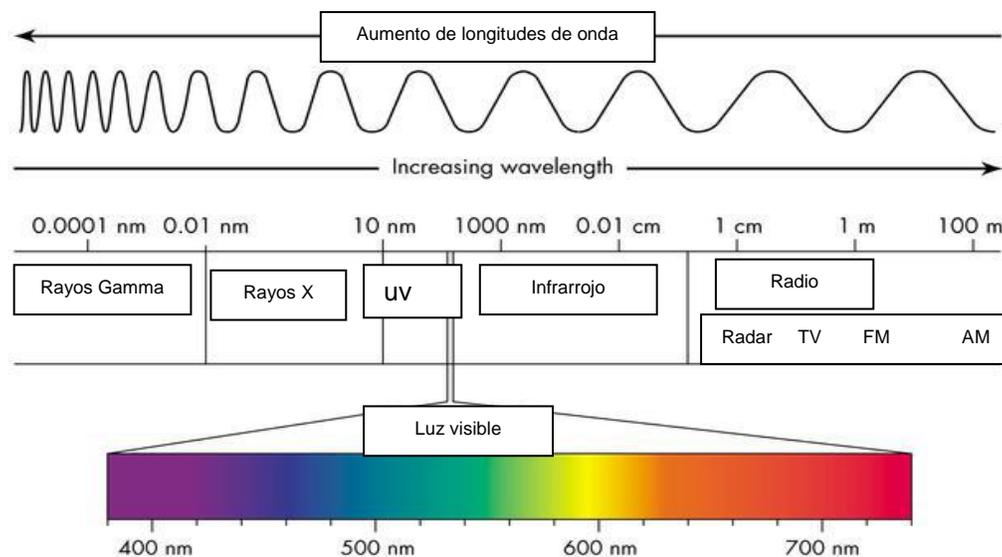


Figura 1. Espectro electromagnético

Fuente: Advanced Proser S.L., 2012

La luz está compuesta por partículas pequeñas o paquetes de energía que se llaman fotones; la energía de un fotón es inversamente proporcional a su longitud de

onda, las ondas con longitudes mayores contienen menos energía por fotón que las ondas con longitudes más cortas, es decir, la luz con longitud de onda más corta tiene más energía por fotón. Al ser absorbido un fotón por una molécula uno de los electrones se excita elevándose de un orbital atómico de menor energía a otro de alta energía. Esto da lugar a dos posibilidades que dependen del átomo y de su entorno: una es que el electrón pueda regresar a su estado fundamental, que es la condición en la cual todos sus electrones se encuentran en estado normal y con los niveles mínimos de energía. Al regresar a su estado fundamental un electrón, su energía se disipa en forma de calor o como una emisión de luz de longitud de onda más larga que la de la luz absorbida. La segunda posibilidad es que el electrón excitado deje el átomo y sea capturado por una molécula que acepte esos electrones, reduciéndose en el proceso, tal como sucede en el proceso de la fotosíntesis. (Jonasz, M., Georges, R. F., 2007).

La radiación solar es la mayor fuente de calor en la columna de agua y es un factor principal para determinar los patrones de viento que se dan en el lago y en las corrientes de agua que desembocan en él. La intensidad de la luz en un lago varía en las diferentes estaciones del año; factores como la nubosidad y la precipitación afectan directa e indirectamente la atenuación. La intensidad de la luz decrece con la profundidad, de esto dependen los procesos fotosintéticos en el ecosistema.

Organismos como fitoplancton, macrófitas y cianobacterias utilizan la energía del sol para sus procesos biológicos, específicamente para la fotosíntesis y es de suma importancia la relación entre ambos ya que el fitoplancton constituye la base de la cadena trófica en un lago. La atenuación de la luz en un cuerpo acuático depende de la cantidad de sustancias disueltas que absorben y dispersan la luz incidente, en donde la mayoría son compuestos de carbono orgánico en la vegetación, pasando por procesos de descomposición en la cuenca hidrográfica.

2.1.1 Interacción de la luz con la materia

En todos los procesos naturales que ocurren en el medio ambiente es muy importante la interacción de la luz con la materia. Las partículas contribuyen de manera significativa a la transferencia de luz solar por medio de la atmósfera y de los cuerpos de agua con implicaciones vitales para el clima de nuestro planeta. Modelos de interacción de la luz con pequeñas partículas y modelos de dispersión de la luz son frecuentemente necesarios para las ciencias analíticas. Un modelo adecuado de dispersión de luz puede predecir las propiedades de las partículas tal como figura, forma, y estructura. La teoría permite predecir las posibilidades de encontrar los fotones en un punto determinado del espacio-tiempo. Estas probabilidades y distribuciones, sus interacciones y dinámicas, siguen una descripción de onda. Para cuantificar el orden de los fenómenos se debe saber que la energía de un fotón E_p está dado por:

$$E_p(\nu) = h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

Donde E_p es la energía de un fotón, h es la constante de Planck y ν es la frecuencia de la onda relativa al fotón. De manera equivalente la fórmula se puede expresar también en términos de la longitud de onda: Aquí c representa la velocidad de la luz y λ representa la longitud de onda. Esto explica que la energía es directamente proporcional a la frecuencia de la onda o, de manera equivalente, inversamente proporcional a la longitud de esta. El *momentum* de una onda está dado por:

$$\vec{p} = \frac{E_p}{c} \hat{i} = \frac{h\nu}{c} \hat{i} = \frac{h}{\lambda} \hat{i} = \frac{h}{2\pi} \vec{k}$$

Donde p es el *momentum* y la fórmula expresa la dependencia directa entre este *momentum* y la energía del fotón (Jonasz, M., Georges, R. F., 2007, página 13).

La onda natural del fotón implica que solo un número finito de estados puede existir en un volumen finito. La parte más complicada de la electrodinámica cuántica es la descripción de la interacción entre los fotones y los electrones y positrones libres. Para poder tener un control sobre las interacciones fundamentales Feynman ideó una

representación gráfica en donde el eje tiempo es vertical y la porción de espacio de la interacción es representada esquemáticamente en una dimensión junta al eje horizontal.

La figura 2 muestra dos diagramas de Feynman de los procesos de emisión y absorción. Las líneas en forma de onda representan los fotones y las líneas rectas representan los enlaces de electrones. La gráfica es una representación de los procesos de emisión espontánea y simulada. No es el número de fotones presente previo a la interacción. En el proceso de emisión se genera un nuevo fotón y el electrón pierde una cantidad de energía en forma de energía cinética si se trata de un electrón libre o de energía potencial si el electrón está enlazado a un átomo o a una molécula. El cambio en energía potencial generalmente ocurre en incrementos discretos (Jonasz, M., Georges, R. F., 2007).

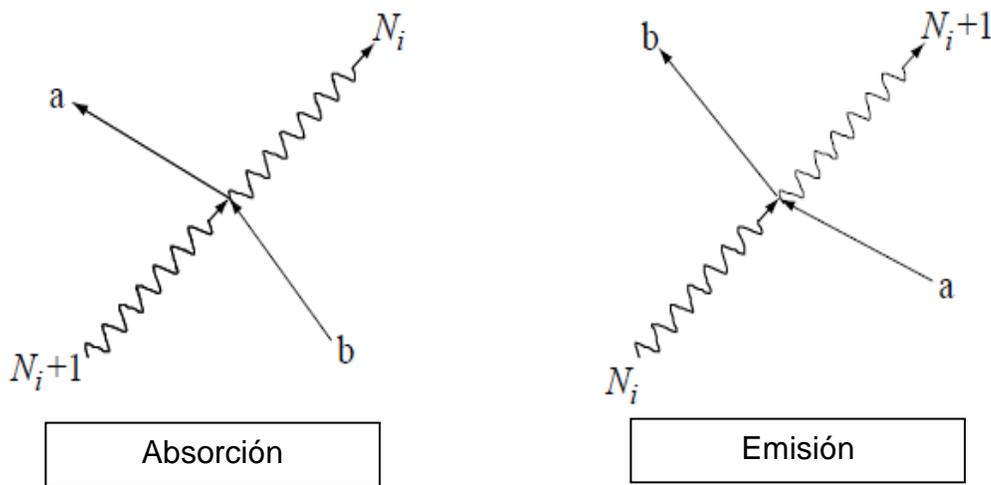


Figura 2. Absorción y emisión de la luz

Fuente: Jonasz, M., Georges, R. F., 2007

El electrón cambia de estado “a” a estado “b” por emisiones, y del estado “b” al estado “a” por absorción. El tiempo corre por el eje vertical y el espacio por el eje horizontal. Los fotones que entran y salen viajan en la misma dirección (estado). La absorción es el tiempo revertido de emisión. El *momentum* para generar que el fotón

gire es también dado o tomado por el electrón. El estado inicial y final del electrón está denotado simbólicamente como “a” y “b” (Jonasz, M., Georges, R. F., 2007).

En el caso de absorción y emisión el estado final del campo es el mismo al del estado inicial del mismo, solamente el número de fotones en ese campo y el estado del electrón varía después de la interacción. La otra posible interacción que incluye cambios en el campo y el estado de electrones se muestra en la figura 3 de dispersión elástica y dispersión inelástica. Para la dispersión inelástica (Raman) hay un cambio adicional en el enlace del electrón de estado “a” a estado “b”, el fotón se absorbe y rápidamente es reemitido que generalmente es en una dirección distinta. La figura del lado izquierdo muestra un diagrama simplificado de este tipo de interacción en el que los fotones salientes y entrantes contienen la misma energía. Es generalmente referido como dispersión elástica. El electrón vuelve a recoger el *momentum* requerido por la ley de conservación del *momentum*. La dispersión es la interacción fotón/electrón en la naturaleza y es la fuente directa o indirecta de casi toda la dispersión de luz en las aguas naturales.

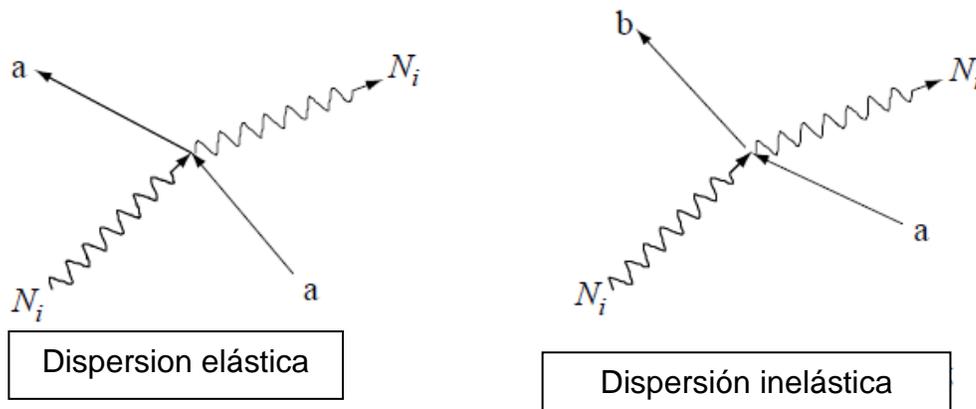


Figura 3. Dispersión elástica e inelástica de la luz

Fuente: Jonasz, M., Georges, R. F., 2007.

2.1.2 Propiedades ópticas del agua

Son varios los factores que afectan la interacción de la luz con los cuerpos de agua. En primer lugar, se puede mencionar al agua que incluso en su forma más pura exhibe una absorción completa de espectro y una cantidad significativa de dispersión de parte de las fluctuaciones. El segundo componente más significativo en el agua es la mezcla de materia orgánica disuelta (MOD), su color amarillo al estar expuesta al sol viene de la fuerte de absorción en las regiones azules y ultravioletas (UV) del espectro electromagnético y también del material biológico que arrastran en los ríos y en las aguas superficiales. También se produce debido a las actividades provocadas por bacterias, virus y especies de plancton. La coloración en las diferentes áreas de un cuerpo acuático varía por lo que la transparencia será distinta también. La presencia de materia orgánica disuelta en función de la profundidad en un cuerpo de agua es el factor principal que afecta al espectro de la luz visible. (Jonasz, M., Georges, R. F., 2007).

Las partículas suspendidas son una mezcla de componentes biológicos como el plancton y de minerales como la arena y el silicio, responsables de la dispersión que ocurre en el agua, que además debido a su capacidad solvente permite tener suficiente materia orgánica disuelta para proteger a los organismos de excesiva radiación UV. (Jonasz, M., Georges, R. F., 2007).

2.1.3 Dispersión de la luz por las partículas de agua

La dispersión de la luz por las aguas naturales es el resultado de la interacción de un largo número de diferentes partículas con la luz incidente. Esto en conjunto con la distribución al azar en el espacio causa que los resultados de sus interacciones con la luz sean incoherentes. Sin embargo, se pueden sumar las propiedades de la dispersión de un grupo de partículas para obtener el efecto de todas las partículas actuando juntas (Jonasz, M., Georges, R. F., 2007).

La distribución de tamaño de partículas, (por sus siglas en inglés “particles size distribution, PSD), la relación entre el tamaño de la partícula y la concentración son los parámetros clave que definirán la interacción de la luz con aguas naturales. La PSD es importante para muchos campos y materias, entre ellos la limnología, química, física, biología, y otras. Este amplio campo de intereses es reflejo de la complejidad de las partículas en aguas naturales, su dinámica y la interacción con otros componentes del medio ambiente. (Jonasz, M., Georges, R. F., 2007).

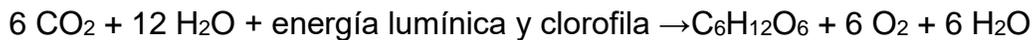
2.1.4 Procesos biológicos y la luz solar

Al examinar un corte de tejido vegetal de una hoja en el microscopio se puede ver como el pigmento verde (clorofila) no está distribuido de manera uniforme en la célula ya que está confinado en organelos llamados cloroplastos. En las plantas se encuentran sobre todo en las células del mesófilo del interior de la hoja, una capa con muchos espacios de aire y una capa de concentración alta de vapor de agua. El interior de la hoja y el exterior intercambian gases gracias a poros microscópicos que se llaman estomas. La clorofila es el principal pigmento de la fotosíntesis ya que absorbe luz. Esta absorción de luz se da principalmente en la región azul y roja del espectro visible, la luz verde no es absorbida en grado apreciable por la clorofila, generalmente las plantas se ven verdes ya que sus hojas dispersan o reflejan parte de la luz que les llega.

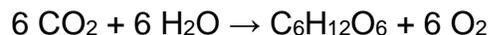
Existen varios tipos de clorofila siendo la más importante la clorofila “a” ya que es el pigmento que da inicio a las reacciones dependientes de la luz en la fotosíntesis. La clorofila “b” es un pigmento accesorio. Se diferencian la clorofila “a” y la “b” sólo en un grupo funcional del anillo de porfirina. Lo que hace esta diferencia es el desplazamiento de las longitudes de onda absorbidas y reflejadas por la clorofila “b” por lo que la “b” aparece de color verde/amarillo y la clorofila “a” se ve de color verde. Con un espectrofotómetro puede medirse la capacidad relativa de diferentes pigmentos de absorber distintas longitudes de onda.

Los cloroplastos tienen también otros pigmentos fotosintéticos tales como los carotenoides que son de color amarillo o anaranjado, éstos absorben longitudes de onda de la luz distintos a los que absorbe la clorofila, de ese modo se amplía el espectro luminoso que aporta energía al proceso fotosintético.

La reacción global de la fotosíntesis se puede describir a continuación; es también la reacción resumida de la fotosíntesis con agua en ambos lados de la reacción debido a que ésta es un reactivo en algunas reacciones y un producto en otras.



Todo el oxígeno que se produce procede del agua por lo que se requieren 12 moléculas de ésta para producir 12 átomos de oxígeno, sin embargo, debido a que no hay un rendimiento neto de H₂O, esta reacción se puede simplificar en la ecuación resumida de la fotosíntesis.



2.2 Atenuación de la luz en ecosistemas acuáticos

Es importante determinar la cantidad de radiación solar y su incidencia en un cuerpo de agua. Es indispensable estudiar la penetración y las profundidades a las que la luz llegará y cómo esto impacta un determinado ecosistema acuático para poder analizar el funcionamiento de la luz solar y sus efectos en un cuerpo de agua. La luz del sol es dispersada en su camino hacia los ecosistemas por ejemplo al pasar por la capa de ozono, chocando con moléculas de dióxido de carbono y agua. Al llegar la luz solar a un cuerpo acuático hay una porción de luz incidente que es reflejada de inmediato por las partículas de agua.

La luz solar logra penetrar a diferentes profundidades e intensidades, en cuerpos acuáticos profundos la luz ya no llega al fondo de la masa de agua. Una gran cantidad de factores influyen en los resultados y efectos de la atenuación de la luz en el agua como por ejemplo el ángulo de incidencia de la radiación solar, la nubosidad y la

magnitud de los vientos que impactan la superficie de agua. La penetración de la luz en el agua depende también de factores como la materia orgánica disuelta (MOD); cualquier tipo de materia suspendida en el agua será también definitiva para determinar la penetración de la luz. Uno de los objetivos fundamentales es conocer cómo se atenúa la luz en el agua e identificar las zonas en donde los organismos son capaces de realizar fotosíntesis y así poder estudiar este fenómeno en diferentes sitios del ecosistema ya que estos procesos son primordiales para el análisis del funcionamiento de este.

La mayoría de las veces en los lagos la luz solar disminuye de manera exponencial conforme a la profundidad. La profundidad máxima en donde se puede registrar el 1% de la luz incidente varía de un cuerpo de agua a otro. Según la transparencia del agua la luz actúa de distinta forma, como se observa en la Figura 4.

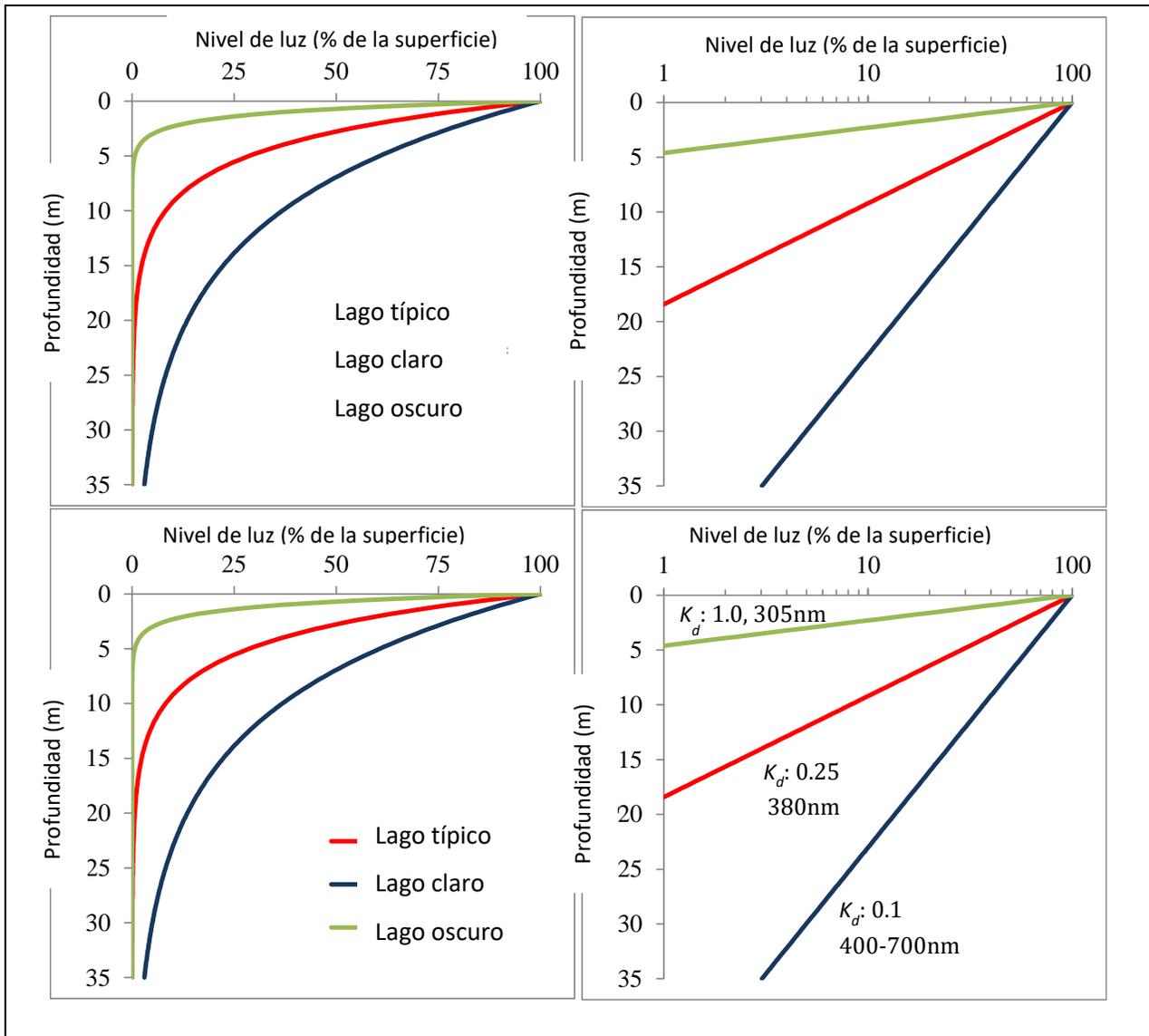


Figura 4. Nivel de luz en lagos con diferentes características de claridad

Fuente: Expedición Científica Atitlán 2013.

En un lago claro la luz se atenúa en una mayor profundidad; en un lago oscuro la atenuación es menor, depende de factores como la turbidez, o niveles de clorofila en el agua. La luz decae exponencialmente en el agua según la fórmula $I_z = I_0 e^{-K_d z}$, en donde "z" es profundidad, "e" es la base del logaritmo natural, K_d es el coeficiente de atenuación difusa.

La pendiente de estas curvas será distinta en cada cuerpo de agua ya que la situación de cada ecosistema presentará distintas características. La zona fótica está determinada por el porcentaje de luz, esta llega hasta la profundidad en la cual desaparece el 99% de la luz solar que incide sobre la superficie. La profundidad de la zona fótica varía a través del día y es diferente en cada cuerpo de agua por todos los factores y situaciones que pueden influir de distintas formas en la transparencia de un ecosistema.

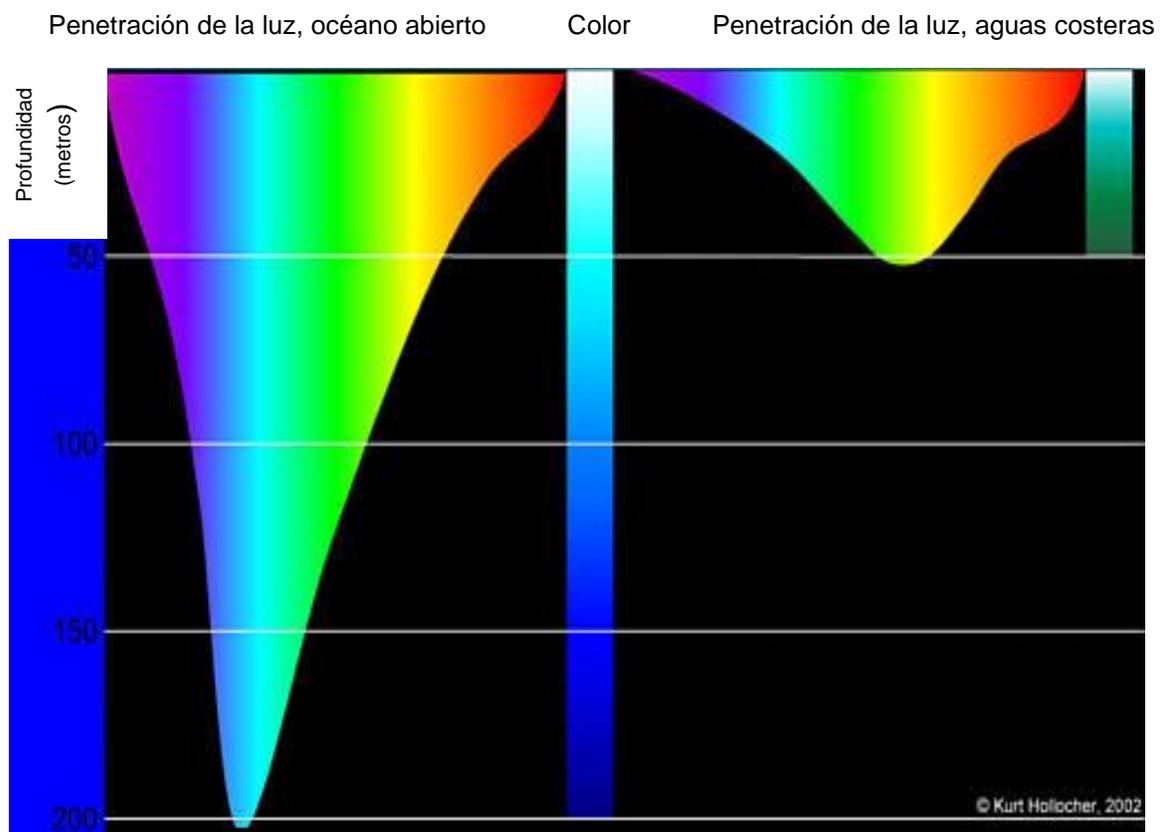


Figura 5. Penetración de la luz en el agua

Fuente: WildCat Lighting, 2002.

La actividad metabólica se ve afectada por la intensidad y la composición espectral de la luz que penetra una columna de agua, esto se desarrolla en todo el cuerpo de agua.

La calidad y la intensidad lumínica son las que regulan la productividad primaria. Los grupos fototróficos en un ecosistema acuático tienen distintas características, su funcionamiento biológico y los parámetros relacionados con la luz solar afectarán de distintas formas a distintos organismos. Las algas, cianobacterias y bacterias fotosintéticas difieren unas de otras en la composición de pigmentos así también su capacidad de absorber energía lumínica es distinta.

Gran parte de la ubicación de muchos organismos en un ecosistema acuático está relacionada también a la luz disponible, ya que diferentes organismos reaccionan de distintas formas dependiendo de la variación en la configuración genética y los pigmentos fotosintéticos. Sin embargo, la luz siempre es factor principal para la productividad primaria.

Los organismos fotosintéticos convierten dióxido de carbono en grandes cantidades de moléculas orgánicas que desempeñan un papel importante en los organismos fotosintéticos y en los no fotosintéticos ya que son los componentes estructurales de las células y constituyen una fuente de energía química que alimenta las reacciones metabólicas que hacen posible la vida en el planeta.

2.3 Zona fótica

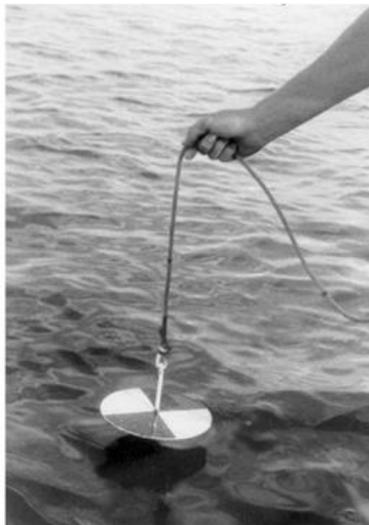
La delimitación de la zona fótica es una medida fundamental de la claridad del agua en los cuerpos acuáticos y es determinada por el contenido de partículas suspendidas, materia orgánica disuelta, minerales y fitoplancton entre otras. Todo lo mencionado contribuye a la atenuación de la radiación solar a medida que la luz desciende por la columna de agua. La producción primaria se encuentra en su máxima actividad en la zona fótica ya que existe suficiente actividad fotosintéticamente activa (PAR) para que se lleve a cabo el proceso de fotosíntesis (Majozi, 2011).

La zona fótica puede ser calculada en base a la profundidad fótica basada en el coeficiente de atenuación, K_d . Sin embargo, la luz se atenúa de distinta forma en cada

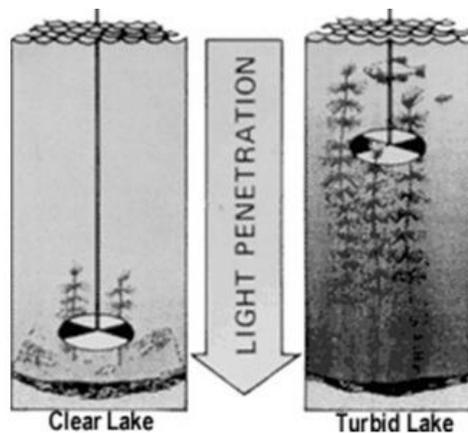
cuerpo de agua por lo que es importante crear un modelo matemático de simulación del comportamiento de la luz específicamente en el lago de Atitlán (Majozi, 2011).

El disco Secchi puede ser utilizado para medir la zona fótica de un lago (Figura 6) sin embargo, existen muchos factores que pueden afectar la precisión de los resultados de este instrumento. Entre estos factores que pueden afectar los resultados del disco Secchi están las condiciones climáticas tales como la nubosidad, el viento, el oleaje, etc. Los resultados podrían ser subjetivos ya que depende del criterio del observador que está tomando las medidas. Por ello es necesario que la zona fótica sea medida con instrumentos de mayor capacidad y precisión tales como una sonda multiparamétrica para medir la radiación fotosintética activa (Photosynthetically active radiation –PAR-)

DISCO SECCHI



Medida de la transparencia con el disco Secchi



$$Z_c = \text{aprox } Z_{\text{Secchi}} \times (2.6-3)$$

Figura 6. Disco Secchi y la medición en lagos claros y turbios

Fuente: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2009

Esta sonda multiparamétrica es capaz de medir distintas longitudes de onda, logrando así una precisión superior en los resultados. Este instrumento detecta las longitudes de onda en las distintas profundidades en donde sea sumergido, es por esto que el uso de esta tecnología presenta grandes oportunidades para investigaciones que

involucran a la luz solar tal como éste estudio, en el cual se estudió el comportamiento de la atenuación de la luz en el lago de Atitlán. Además, se podrían estudiar otros temas relacionados como el efecto del cambio climático y otros temas igualmente importantes para la ciencia y para otros ecosistemas.

2.4 Lago de Atitlán

El lago de Atitlán forma parte del área protegida “Reserva de Usos Múltiples de la Cuenca del Lago de Atitlán. Se encuentra a una elevación de 1565 msnm y tiene una edad de 85,000 años. Contiene un volumen de 24 km³, una profundidad máxima mayor a 350 m y una profundidad promedio de 188 m; el área superficial es de 137 km² (Dix, et al., 2010). En la cuenca del lago de Atitlán habitan aproximadamente 400,000 personas y su extensión es de 541 km².

El lago de Atitlán representa un movimiento económico significativo para el país ya que es uno de los sitios turísticos más importantes de Guatemala, por lo que la calidad del agua del lago influirá en este movimiento económico a nivel nacional. El lago además proporciona servicios ambientales a los pobladores de la cuenca como por ejemplo la pesca, la agricultura, transporte y recreación, etc. La transparencia y claridad del lago es uno de los parámetros más importantes para los visitantes ya que representa la primera evidencia visual de contaminación, juzgando por sus características organolépticas como el color y olor.

Es importante estudiar la claridad del agua ya que la transparencia tiene mucha relación con la calidad del recurso hídrico, y esto es primordial para las personas alrededor de la cuenca que utilizan el agua para subsistir. Por esto y por otros motivos es fundamental estudiar la transparencia y el comportamiento de la luz del ecosistema acuático Atitlán para poder relacionar la información generada con otros estudios e investigaciones que se realizan hoy en día, y de esta manera se tenga una visión integral sobre los problemas que enfrenta el lago.

2.4.1 Transparencia del agua en el lago de Atitlán

La Autoridad para el Manejo Sustentable de la Cuenca del Lago de Atitlán y su Entorno -AMSCLAE- y el Centro de Estudios Atitlán –CEA- de la Universidad del Valle de Guatemala han estudiado la transparencia del lago utilizando el disco Secchi por lo que se tiene información sobre cómo se ha comportado la luz en el lago de Atitlán a través de los últimos años. Sin embargo, el disco Secchi cuenta con características que hacen que esta información tenga márgenes grandes de error. En la presente investigación se relacionaron las medidas de la sonda multiparamétrica que mide PAR utilizada por la AMSCLAE con las medidas del disco Secchi para poder establecer la relación entre estos dos aparatos y así validar y evidenciar la correlación de la información generada por medio de los modelos matemáticos que se utilizaron en este trabajo (Dix, et al., 2010).

La transparencia del lago ha sido afectada por actividades antropogénicas, así como distintos fenómenos naturales impredecibles como la tormenta tropical Agatha en 2010, siendo uno de los impactos más notables la entrada de materia orgánica y sedimentos al lago. Debido a que el lago de Atitlán se encuentra en una cuenca endorreica cuya característica es que no posee una salida evidente, toda la materia orgánica que ingresó provocó la entrada de nutrientes que trae como consecuencia la eutrofización del lago debido al exceso de nutrientes que pueden traer efectos adversos y causar cambios físicos en el lago (Majozi, 2011).

2.4.2 Atenuación de la luz en el lago de Atitlán

Durante el mes de junio de 2013, un grupo de científicos internacionales llevó a cabo un proyecto de investigación que abarcaba diferentes temas en el lago de Atitlán con el objetivo de conocer la dinámica de este y plantear soluciones a mediano y largo plazo para su recuperación. Entre las investigaciones realizadas se llevó a cabo un proyecto para estudiar la atenuación de la luz en el lago. Se utilizó una sonda multiparamétrica para medir la profundidad PAR y el disco Secchi para medir la transparencia. Se eligieron distintos sitios de muestreo para realizar las mediciones y tener una idea del comportamiento de la luz en el lago de Atitlán. Por medio de estas

mediciones se obtuvo información importante que fue de utilidad para los estudios de fitoplancton, zooplancton, perifiton, y otros bioensayos que se realizaron en este mismo proyecto. Se identificaron los sitios en donde la turbidez fue mayor y se pudo entender de forma preliminar sobre el funcionamiento de este ecosistema acuático, concluyendo que existe una relación entre las medidas del disco Secchi y las mediciones de la sonda multiparamétrica que mide PAR; sin embargo, esta relación puede variar debido a condiciones climáticas y estacionales tales el viento, nubosidad, radiación solar, entre otras.

Además de medir la intensidad de la luz en el lago de Atitlán se realizaron las mismas mediciones en las desembocaduras del río Quiscab y del Río San Francisco que contienen una alta carga de sedimentos, donde se observó que la transparencia del agua decreció cuando se realizaron las mediciones cerca de estos ríos. Se realizó la misma medición en el punto más profundo del lago (centro del Lago, Weiss G) utilizado como punto de comparación, en donde se observó una mayor transparencia en el agua como se muestra en los resultados preliminares de la figura 7, debido a que en este punto se tiene poca influencia y entrada de sedimentos. A partir de este proyecto se evidenció importancia de continuar con el estudio de la atenuación de la luz en este ecosistema acuático.

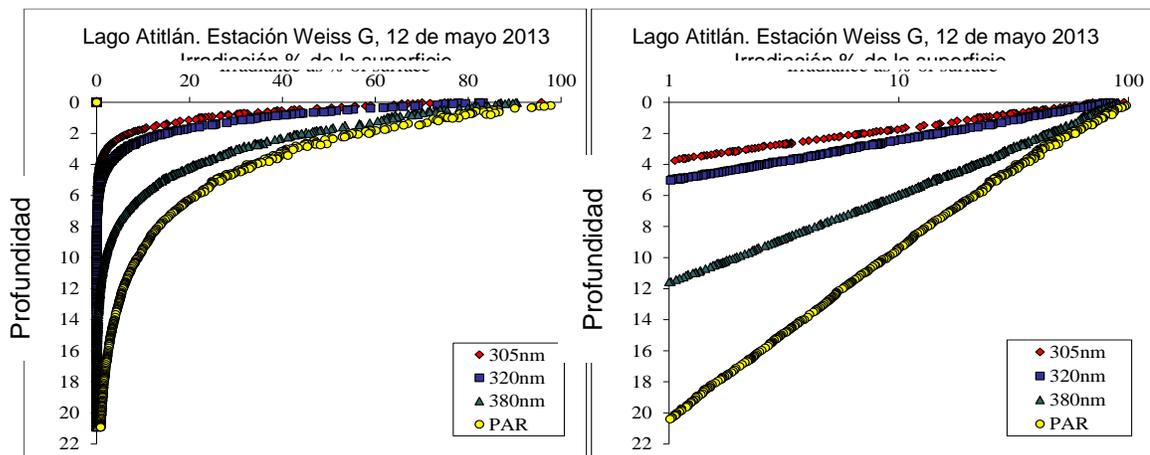


Figura 7. Atenuación de la luz en punto Weiss G, Lago de Atitlán junio 2013

Fuente: Expedición Atitlán 2013.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 Definición del problema y justificación del trabajo

En los últimos años, el lago de Atitlán ha enfrentado cambios drásticos en sus condiciones físicas, químicas y biológicas que se evidencian como cambios perjudiciales para este cuerpo de agua. El cambio de color en el agua es evidencia de un mal manejo del ecosistema y es muestra también de la degradación del sistema natural. El surgimiento reciente de afloramientos de algas es también un factor determinante de los cambios físicos y químicos que este cuerpo de agua está pasando.

No conocer el comportamiento de la luz en el lago de Atitlán es una limitación para otras investigaciones que actualmente se realizan en este lago. Ejemplo de ello son los bioensayos o el estudio de la clorofila. Es necesario entender cómo se comporta la luz solar para poder utilizar esta información en otras investigaciones que ayudarán a tener un mejor entendimiento sobre el manejo que se debe realizar en la cuenca.

Es trascendental estudiar el comportamiento de la penetración de la luz en el agua, ya que es uno de los factores que determina la transparencia del cuerpo acuático. Los escenarios de riqueza natural y los procesos a los que se expone toda la materia dentro de este cuerpo de agua son en gran parte regidos por la luz solar. Esta es responsable de procesos meteorológicos tales como la evaporación y el movimiento de las corrientes de agua, de procesos biogeoquímicos tales como el del nitrógeno y fósforo que es fuente de energía para aquellas especies que dan inicio a la cadena trófica en el ecosistema.

La energía de la luz del sol es utilizada por organismos fotosintéticos capaces de crecer aceleradamente si tienen las condiciones apropiadas de nutrientes e intensidad de luz y es este crecimiento acelerado el que amenaza la claridad y color del agua en el lago de Atitlán por lo que es necesario conocer y explicar cómo se comporta la luz en este cuerpo de agua. Es esencial estudiar la atenuación de la luz en el agua para establecer las relaciones con otros procesos químicos y biológicos que son importantes

para la salud y comportamiento integral del lago, de esta forma poder actuar de manera adecuada y eficiente contra las amenazas que ponen en peligro este ecosistema.

Es por ello que, a partir de los datos recolectados, y utilizando un software específico se planteó un modelo matemático de simulación de atenuación la luz en el agua y se estableció la correlación presentada en el modelo y los datos, logrando estudiar desde otro punto de vista una de las variables más importantes que rigen los procesos tanto químicos como biológicos en el lago.

Los datos científicos y técnicos obtenidos serán de utilidad a futuras investigaciones que propongan acciones para la recuperación de la calidad del agua del lago de Atitlán cuyos parámetros han sido modificados y degradados a través del tiempo como los niveles de oxígeno y nutrientes en el lago. También para poder estudiar los problemas a los que se enfrenta hoy en día y relacionar este estudio con otros que actualmente intentan solucionar problemas en común como el cambio en el color del agua.

Estos datos que hasta el momento no habían sido generados en ningún cuerpo acuático del país, incluyendo el lago de Atitlán, son de principal interés para entender los ecosistemas acuáticos que constituyen una enorme riqueza para el país.

Estudiar el comportamiento de la luz solar y su relación con el ecosistema acuático del lago de Atitlán es una herramienta útil para entender por ejemplo los procesos de afloramiento de cianobacterias que han afectado al lago y que seguramente seguirán siendo una de las grandes amenazas a este ecosistema. Si en el año 2008 y 2009 se hubiera tenido datos exactos de atenuación de luz se hubiera podido abordar la problemática con distintas perspectivas, tomando en cuenta los datos científicos obtenidos para la resolución de problemas ya que al conocer con exactitud los rangos de luz que existían en cada porción del lago se hubiera podido dar distintos enfoques y métodos que fueran beneficiosos para comprender de mejor forma los sucesos. Estos afloramientos tienen una relación directa con la atenuación de la luz ya que los organismos como la cianobacteria *Lymnoraphis robusta* utilizan la luz solar como energía química para existir y reproducirse.

La luz tiene una relación directa con la cadena trófica y todo el ecosistema, desde la productividad primaria por lo que debe ser caracterizada creando modelos que ayuden a entender su comportamiento y relación con cada elemento del sistema ecológico. Es primordial delimitar la zona fótica del lago y estudiar el comportamiento de la luz en las diferentes estaciones del año. De esta forma empezar a ordenar la información que nos proporciona la tecnología que se utiliza en esta investigación como lo es la sonda multiparamétrica, ya que, sin un manejo adecuado de la información, esta no sería útil.

Al establecer la relación entre el disco Secchi y la sonda multiparamétrica mediante modelos matemáticos que simulen el comportamiento de la luz es posible manejar y enriquecer el modelo con datos de años anteriores, haciendo uso de los recursos tecnológicos con los que ahora se cuenta para medición de PAR y finalmente los datos serán de mucha utilidad para realizar nuevas investigaciones o continuar y extender las que actualmente se están llevando a cabo, aumentando la información generada en los próximos años en beneficio del lago.

IV. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general:

Estudiar y analizar el comportamiento de la luz solar en el ecosistema acuático del lago de Atitlán.

4.2 Objetivos específicos

Estudiar el comportamiento de la luz solar y caracterizar la atenuación de la luz fotosintéticamente activa -PAR- (Photosynthetically Active Radiation) en el lago de Atitlán.

Delimitar la zona fótica del lago de Atitlán y estudiar el comportamiento de la luz solar en las diferentes estaciones del año.

Establecer la relación entre la profundidad Secchi y la profundidad PAR para analizar la información de las anteriores medidas Secchi.

Proponer un modelo matemático para simular el comportamiento de la atenuación difusa en el pasado y futuro del lago de Atitlán.

V. METODOLOGÍA

5.1 Localización del estudio

El lago de Atitlán pertenece al departamento de Sololá que se encuentra situado en la región Sur Occidental de Guatemala.

Cuadro 1. Datos generales del lago de Atitlán

Extensión del lago de Atitlán	130 km ²
Altitud del lago de Atitlán	1560 msnm
Volumen del agua	24.4 m ³
Longitud del lago de Atitlán	15 km
Ancho del lago de Atitlán	11 km
Profundidad mayor	350 metros
Menor profundidad	0.5 metros
Origen	Volcánico
Cuenca del lago de Atitlán	541 km ²
Efluentes	No existen salidas superficiales
Temperatura media anual del aire	19.4° C
Precipitación anual	4500 y 1000 mm

Fuente: Dix, et al., 2010.

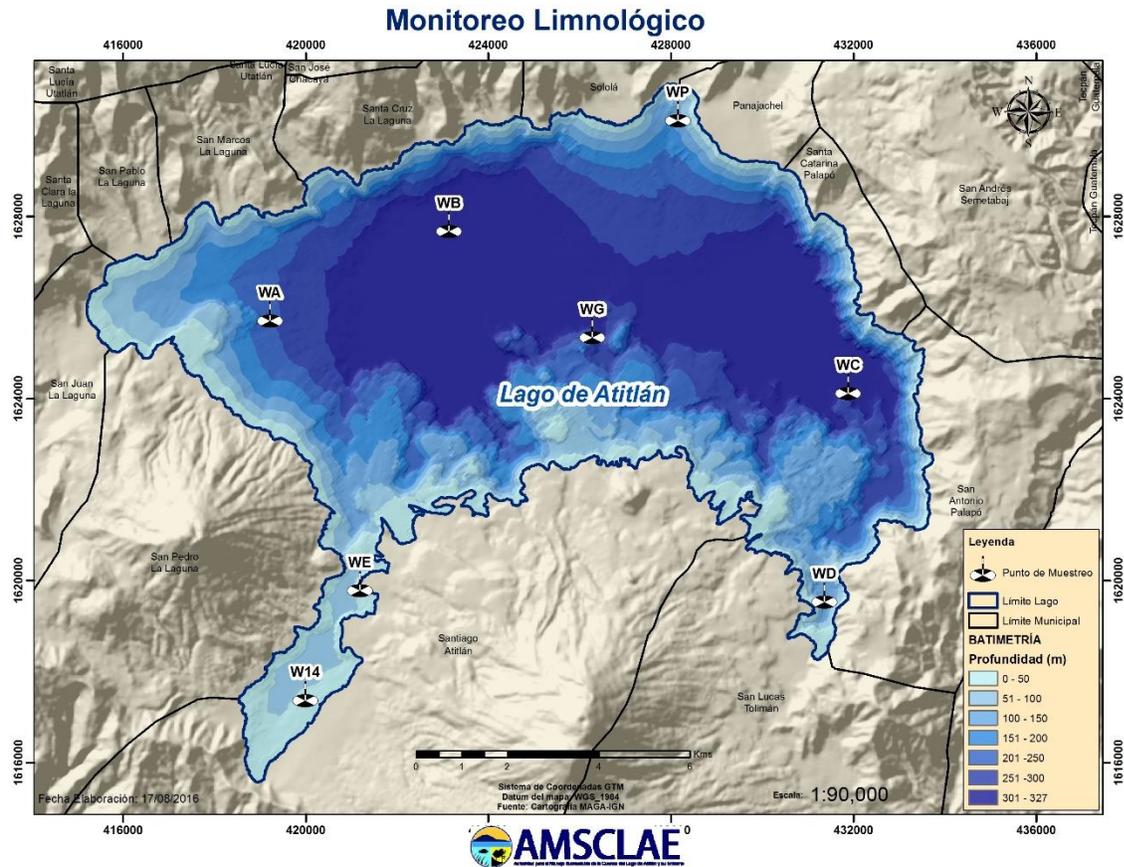


Figura 8. Batimetría del Lago de Atitlán

Fuente: AMSCLAE, 2016

5.2 Material experimental

La unidad de análisis sujeta a estudio fue el agua del lago de Atitlán.

5.3 Factor a estudiar

Se estudió la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y el comportamiento de la atenuación de la luz en el agua ocho sitios de muestreo del lago de Atitlán.

5.4 Unidad Experimental

El agua del lago de Atitlán de ocho sitios de muestreo identificados como: W14, WA, WB, WC, WD, WE, WG y WP que abarca desde la superficie hasta 30 metros de profundidad debido a que las mediciones realizadas anteriormente con el disco Secchi y

con la sonda multiparamétrica han demostrado que la profundidad PAR no supera los 30 metros.

5.5 Esquematización del experimento (Croquis de campo)

Ubicación de los 8 sitios de muestreo utilizados para el muestreo mensual durante un año.

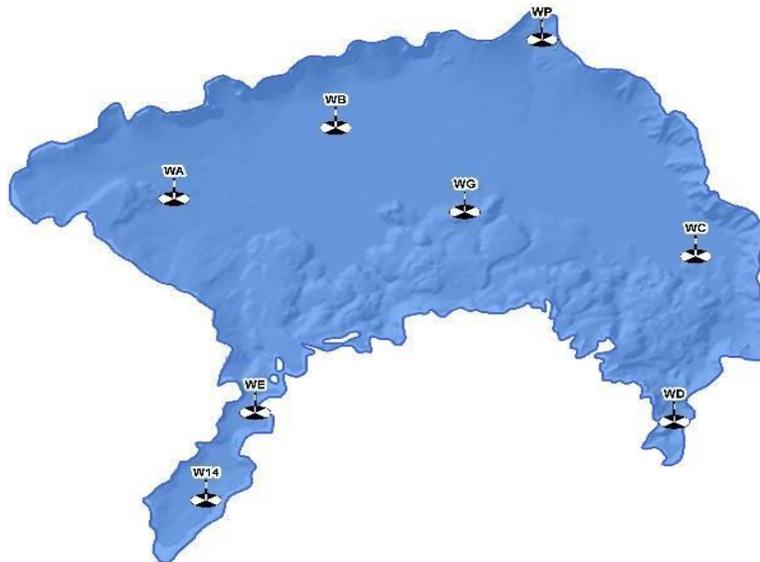


Figura 9. Sitios de muestreo en el Lago de Atitlán

Fuente: AMSCLAE, 2016.

5.6 Manejo del experimento

5.6.1. Muestreo

Se eligieron 8 sitios de muestreo en base a los criterios de la Autoridad para el Manejo Sustentable del Lago de Atitlán y su Entorno -AMSCLAE-, los puntos de muestreo se eligieron estratégicamente para abarcar la mayor superficie del lago, y se utilizaron criterios en base a población, la desembocadura de los principales ríos, el punto medio del lago, y otros. Los sitios donde se realizaron los monitoreos fueron

georeferenciados por medio de un receptor de Sistema Global de posicionamiento (GPS).

Cuadro 2. Ubicación de los puntos de muestreo

Puntos de Muestreo	Sistema de Coordenadas GTM	
	X	Y
W14	419998	1617504
WA	419225	1625842
WB	423145	1627806
WC	431889	1624253
WD	431368	1619669
WE	421190	1619924
WG	426282	1625477
WP	428159	1630240

Fuente: AMSCLAE, 2016.

Los monitoreos fueron realizados de manera mensual durante un año, iniciando las mediciones a las 7:00 a.m. En cada punto de muestreo se tomaron medidas de intensidad PAR introduciendo la sonda multiparamétrica en el agua desde la superficie hasta la profundidad que el sitio de muestreo permitiera, no mayor a 200 metros.

5.6.2 Realización de las mediciones

Cada medición tomó un tiempo de 45 minutos aproximadamente, en cada sitio de muestreo. El procedimiento para la obtención de resultados consistió en introducir la sonda multiparamétrica en la superficie del agua del lago, esperar a que se estabilizara para asegurar la adecuada recolección de datos.



Figura 10. Estabilización de la sonda multiparamétrica que mide PAR

Una vez estabilizada la sonda se procedió a introducirla al agua lentamente a la profundidad que el sitio permitiera, el límite máximo de alcance en la profundidad de la sonda multiparamétrica fue del tamaño de la cuerda, 200 metros.



Figura 11. Introducción de la sonda multiparamétrica en el agua

Una vez introducida la sonda multiparamétrica para la medición de PAR, empiezan a desplegarse los datos en el medidor multiparamétrico, es necesario observar el comportamiento de los datos para detectar anomalías en los resultados, ya que si se observan es necesario retirar la sonda del agua e introducirla de nuevo.



Figura 12. Observación de los resultados en el medidor multiparamétrico
Simultáneamente fueron tomadas las medidas con el disco Secchi para establecer la correlación entre éste y la sonda.



Figura 13. Medición con el disco Secchi

Posterior a realizar las mediciones fue necesario extraer la cuerda la cantidad de metros a la que se logró introducir (aproximadamente de 30 a 200 metros) teniendo cuidado al enrollar la cuerda.



Figura 14. Sonda multiparamétrica para medir PAR

5.6.3 Obtención de información

La información obtenida del medidor multiparamétrico fue directamente transferida al disco duro de la computadora y de esta forma se identificó inmediatamente la existencia de anomalías en el comportamiento de los instrumentos. La base de datos fue almacenada en hojas de cálculo de Excel para su posterior interpretación, llevando un control de todas las mediciones según el mes y el sitio donde fueron tomadas.

5.6.4 Toma de datos de campo

Se observaron y se anotaron en las hojas de campo las condiciones climáticas presentes al momento de tomar dichas medidas, debido a que pueden intervenir en los resultados del disco Secchi. Además, se tabularon los datos del disco Secchi.

5.6.5 Control de Calidad

Para el aseguramiento de la calidad de los resultados se calibró y preparó el equipo técnico entre ellos la sonda multiparamétrica para medición de PAR y el disco Secchi, que se utilizó en la fase de campo.

5.7 Análisis de la información

Los resultados obtenidos se analizaron utilizando el software matemático para modelación y simulación MAPLEsoft™ como ayuda en la elaboración del modelo matemático. A través de este software fue posible realizar los cálculos matemáticos necesarios para consolidar toda la información obtenida durante la fase de muestreo en un modelo matemático. Este modelo matemático fue soportado, verificado y confrontado con las mediciones obtenidas a través de la sonda multiparamétrica que mide PAR y el disco Secchi.

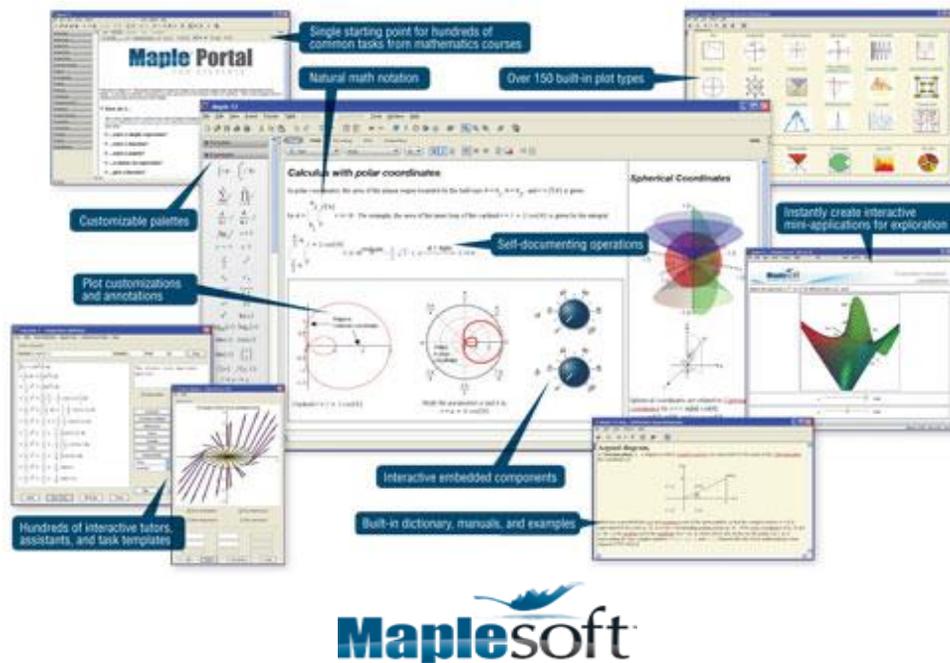


Figura 15. Software MAPLEsoft™

El software SURFER® también fue una herramienta importante para poder entender la información de una manera visual y de esta manera poder exponer los resultados de forma gráfica y legible. Gracias a ello, la zona fótica del lago pudo ser

expuesta de una manera dinámica, utilizando colores, gráficos en tercera dimensión y figuras a escala.

5.8 Tipo de investigación

La presente investigación es descriptiva, no experimental y exploratoria, en donde se delimitó la zona fótica del lago y se estudió el comportamiento de la luz solar midiendo cuantitativamente la intensidad de la luz en el Lago de Atitlán

5.9 Instrumentos, equipo y software

Se utilizó una sonda con medidor multiparamétrico marca Hydrolab OTT modelo DS5 que permitió determinar la zona fótica a través de mediciones continuas a distintas profundidades; de manera simultánea se utilizó también un disco Secchi para identificar la relación de cambio entre estos dos instrumentos.

Se utilizó el software MAPLEsoft™ y SURFER® para la elaboración de los modelos matemáticos y gráficas. Una computadora portátil para guardar toda la información que se generó a lo largo del estudio, esta herramienta también fue necesaria para la toma de datos ya que los equipos de medición de luz en el agua se conectan directamente a la computadora para observar los resultados de manera inmediata y simultáneamente poder guardarlos.

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se puede observar en la figura 16 el comportamiento que tiene la radiación fotosintéticamente activa –PAR- a medida que se aumenta la profundidad. En la

ecuación matemática propuesta se observa como decae la luz exponencialmente a medida que aumenta la profundidad, este comportamiento es similar en todas las mediciones realizadas, en los ocho sitios muestreados. Los datos evidencian una alta correlación debido a que el coeficiente de correlación R, fue cercano a 1, teniendo una correlación entre ambas medidas para este sitio de muestreo y tiempo específico (sitio WD, septiembre, 2014) de 0.9916, que además representa el valor de r más alto de todas las medidas calculadas (ver Anexos, figura 44 a la 55), tanto en época lluviosa como en época seca. Además, se logró obtener el punto exacto de cada sitio de muestreo en donde atenúa la luz en un 99% delimitando la zona fótica en cada punto.

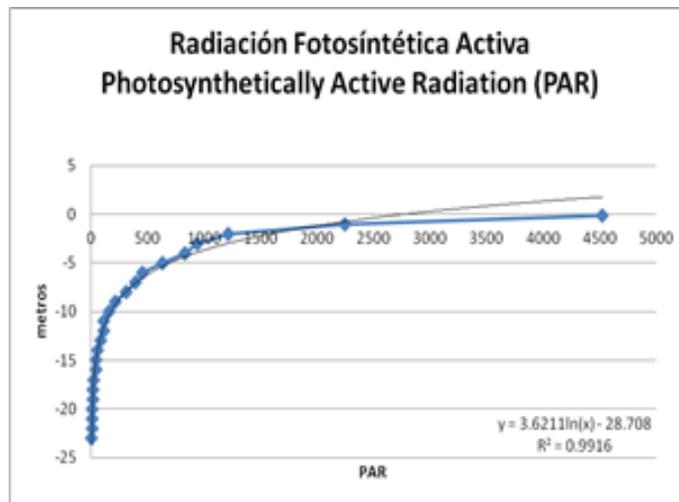


Figura 16. Comportamiento de PAR ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) y la profundidad en el punto WD en septiembre de 2014

En la figura 17 se puede observar que la correlación entre los datos de la medida de profundidad tomada con el disco Secchi y PAR es muy baja. Sin embargo, se obtuvo un factor de conversión de $0.420x$ que en este momento sería arriesgado, sin embargo, queda establecida la metodología para obtener ese factor de conversión. Es probable que al ingresar más información que alimente la base de datos la correlación incremente y sea posible utilizar el factor de conversión para convertir todos los datos que se han obtenido de la profundidad Secchi a datos de profundidad PAR y de esta forma analizar todos los datos del disco Secchi que se han obtenido en el pasado,

estudiando ampliamente el comportamiento de la atenuación de la luz solar en el ecosistema acuático del lago de Atitlán a través del tiempo.

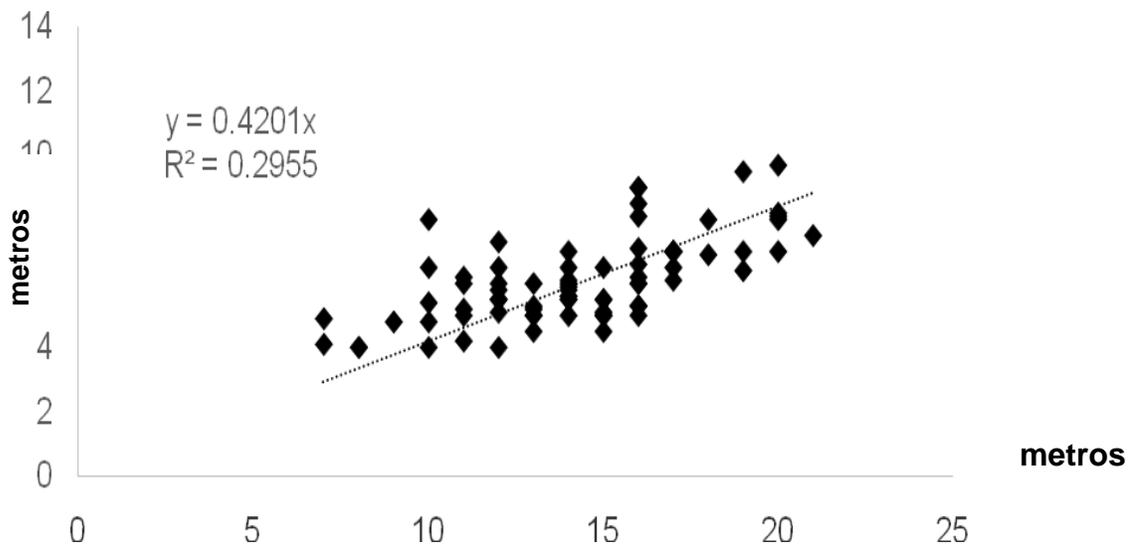


Figura 17. Correlación de las medidas de profundidad con el disco Secchi y PAR

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y software MAPLEsoft™

En la figura 18 se muestra una mayor correlación entre las medidas de la profundidad del disco Secchi y PAR en la época lluviosa (de mayo a octubre) con un 50% de correlación. Podría ser factible la utilización del factor de conversión en esta época sin embargo no sería recomendable ya que la correlación sigue siendo baja, en este caso también se aumentaría la correlación al incrementar la información en la base de datos. La época lluviosa tiene varias implicaciones ecológicas, como el crecimiento de fitoplancton, por ejemplo, que se relaciona directamente con la penetración de la luz en el lago. El ingreso de altas concentraciones de materia orgánica al sistema endorreico por medio de la escorrentía que está implícita en la época lluviosa también es importante para el estudio de la claridad en el agua.

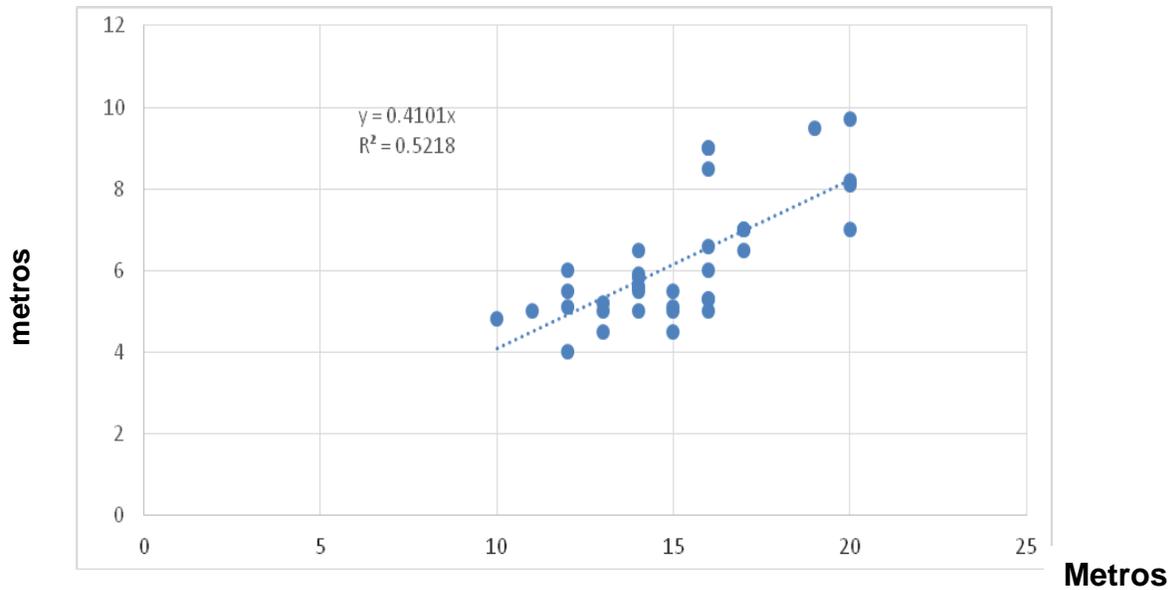


Figura 18. Correlación de las medidas de profundidad con el disco Secchi y PAR para la época lluviosa

La figura 19 muestra la correlación obtenida en las mediciones de profundidad realizadas con el disco Secchi y PAR durante la época seca (de noviembre a abril). Con una correlación negativa de 0.003 puede deducirse que no existe ninguna correlación, por lo que el factor de conversión no puede ser utilizado. Además, se observa el comportamiento de los datos agrupándose alrededor de la línea de tendencia al igual que las figuras 17 y 18. Es probable que al incrementar el número de datos la correlación incremente y sea posible utilizar el factor de conversión también para esta época.

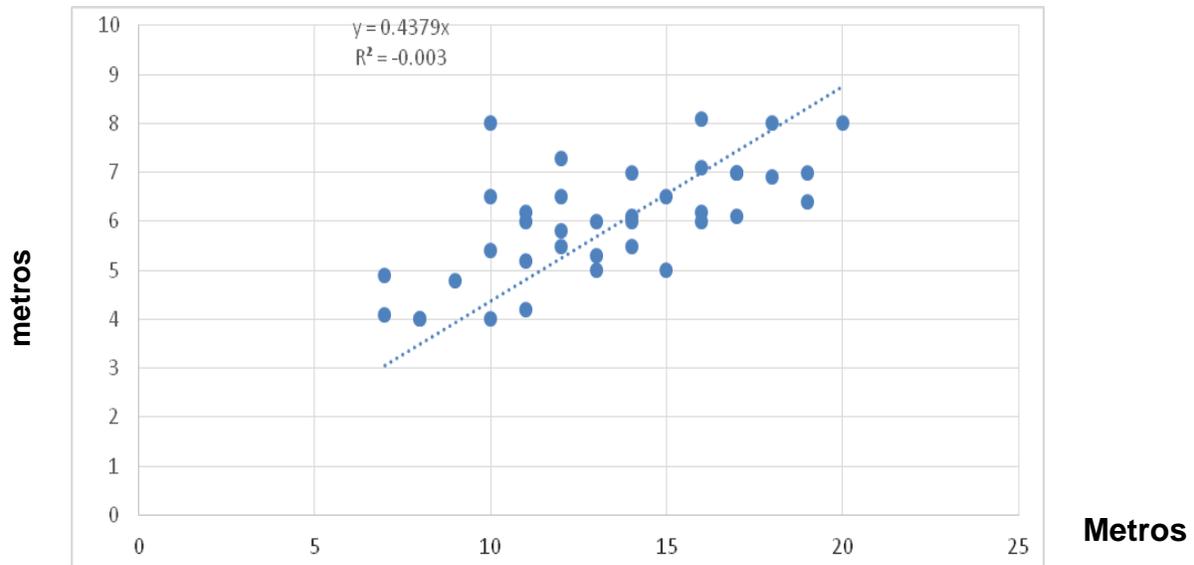


Figura 19. Correlación de las medidas de profundidad con el disco Secchi y PAR para la época seca

Se puede observar en el cuadro 3 que los valores más altos de la zona fótica se encuentran en abril de 2015 (números rojos) para la mayoría de los puntos de muestreo, sin embargo, para los puntos WC y WD estos valores aparecen en julio de 2014. La mayoría de los sitios presentan el valor más alto en julio a partir del cual comienza a disminuir hasta llegar a un valor mínimo que está entre diciembre y marzo.

Es difícil explicar con certeza lo que aquí está ocurriendo ya que los datos y los puntos medidos son limitados, el periodo en el que se midieron es corto y sería muy precipitado sacar conclusiones definitivas en base a los resultados que hasta este punto se tienen, las coordenadas de los sitios no muestran mayor relación debido a las distancias y los diferentes sitios en que se encuentran, los puntos elegidos están a diferentes distancias de las orillas del lago, a diferentes distancias de los centros más poblados, con profundidades diferentes, etc. En un futuro podrían compararse las medidas que se obtendrán sobre la zona fótica en el lago con las medidas predichas a partir de la utilización del modelo matemático.

La mayoría de los datos de la zona fótica oscilan alrededor de 18 metros en promedio por lo que el lago de Atitlán podría ser considerado como un lago mesotrófico. A pesar de que hay medidas que se acercan a los 35 metros que es la profundidad en

la que atenúa la luz en un lago oligotrófico, ninguna de las medidas tomadas en el año penetró más de 30 metros obteniendo la medida más alta en abril 2015 con 29 metros, que se acerca a los valores de un lago claro u oligotrófico. Sin embargo, algunas medidas están cerca del otro extremo, medidas que hacen que el lago pueda ser catalogado como turbio como por ejemplo la medida del punto W14 y WC en febrero del 2015 con una profundidad de 7 y otras medidas similares características de un lago eutrofizado.

Cuadro 3. Profundidad de la zona fótica (m)

	WA	WB	WP	WC	WD	WE	W14	WG
May-14	20	21	Nm	Nm	Nm	16	15	Nm
Jun-14	19	16	12	20	17	12	11	16
Jul-14	22	23	17	23	23	16	12	16
Aug-14	20	20	14	22	Nm	15	13	16
Sep-14	17	17	14	16	14	14	14	14
Oct-14	16	15	13	15	14	12	10	13
Nov-14	16	17	15	14	12	12	10	11
Dec-14	16	15	22	17	16	10	8	10
Jan-15	13	19	20	10	15	12	9	18
Feb-15	14	13	Nm	7	16	13	7	8
Mar-15	14	18	17	14	11	11	11	12
Apr-15	29	28	26	20	21	23	19	24
Promedio	18	17	17	16	16	14	12	14

Nm= no medido Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo

En la figura 20 puede observarse gráficamente la profundidad de la zona fótica durante el ciclo anual analizado en los ocho sitios de muestreo en el lago de Atitlán. Los valores negativos únicamente son indicativos de que las medidas son tomadas desde la superficie (punto 0) descendiendo en profundidad en la columna de agua. En realidad, debe leerse como valores absolutos. Puede observarse que la mayoría de los resultados oscilan entre 15 y 20 metros, características de un lago típico o mesotrófico.

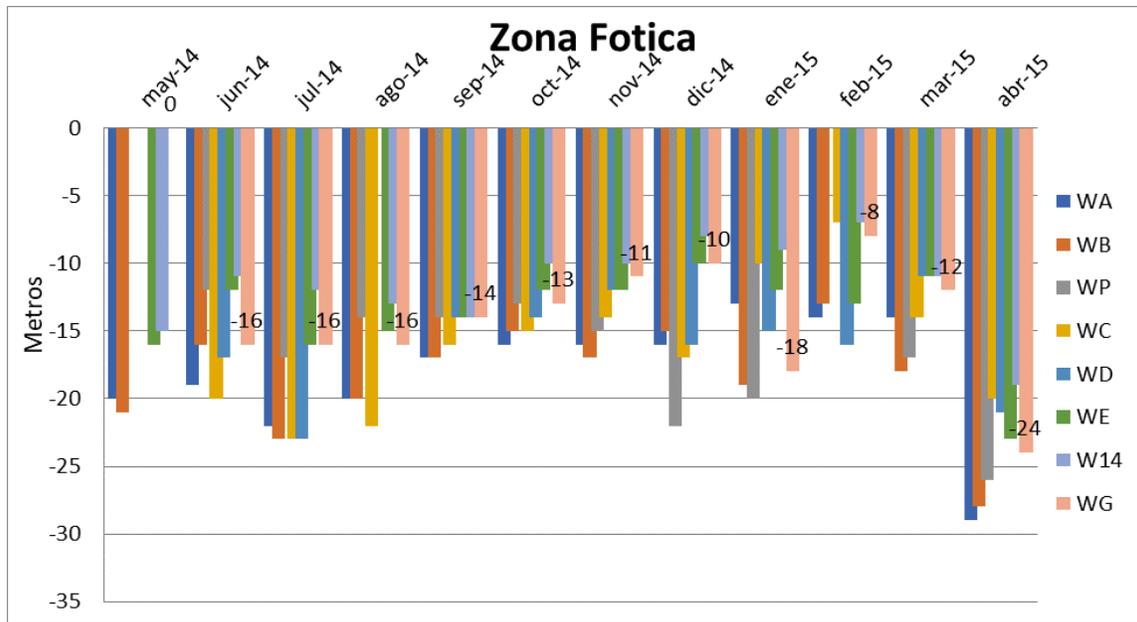


Figura 20. Zona fótica en el ciclo anual de mayo 2014 a abril 2015

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo

Al observar los promedios de la profundidad de la zona fótica en la figura 21 se hace evidente como la luz llega a su máxima profundidad en el mes de abril y la máxima atenuación se da en febrero.

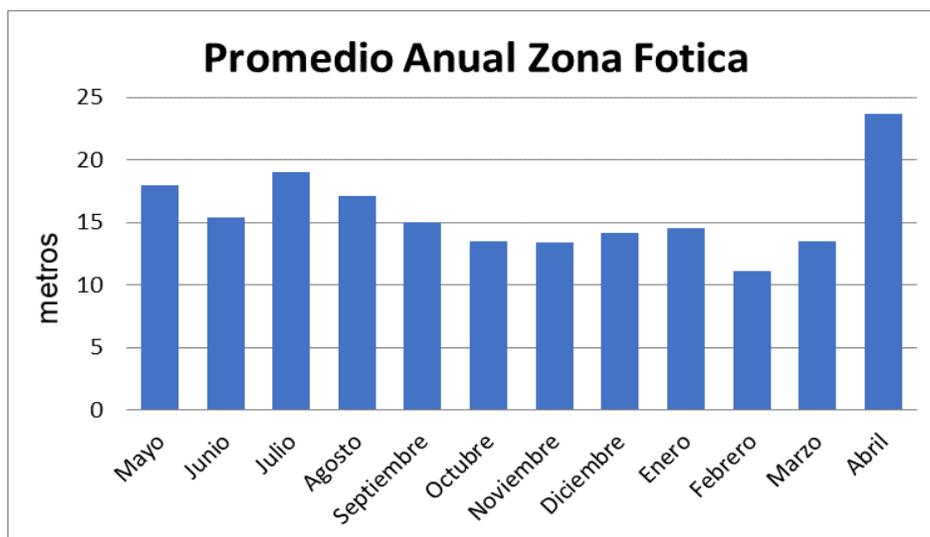


Figura 21. Promedio zona fótica del ciclo anual mayo 2014 a abril 2015 (metros)

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo

Con la información del ciclo anual de mayo 2014 a abril 2015 fue posible realizar predicciones mediante el software MAPLEsoft™ de cada sitio de muestreo en base a la información de los meses medidos, pese a ello los resultados tienen una confiabilidad muy baja, ya que para la elaboración de un modelo matemático confiable son necesarios más datos con los que sería posible encontrar un patrón de comportamiento de la atenuación de la luz, ya que hasta el momento solo se cuenta con la información de un año. Al agregar más información la confiabilidad del modelo incrementaría.

Las predicciones realizadas con únicamente datos de un año se muestran en las figuras de la 22 a la 37, en donde el eje “y” está representado por la profundidad de atenuación y el eje “x” representa el ciclo anual medido (mayo 2014 a abril de 2015), éstas figuras se proyectan un mes hacia adelante, es decir se predice el promedio de mayo de 2015 del punto WG. En todas las figuras además de tener el promedio, tienen la predicción del valor PAR para el treceavo mes del año que es el valor que se está prediciendo, correspondiente a mayo de 2015 y está representado por un asterisco. Estos cálculos y predicciones se realizaron para los ocho sitios muestreados en el lago de Atitlán basado en los datos de profundidad de la atenuación de la luz solar en el ciclo de mayo 2014 / abril 2015, sin incluir en el modelo otros factores del ecosistema ya que es un modelo matemático basado en los doce meses del ciclo y la profundidad en metros a la que atenuó la luz en un 99% en cada uno de los meses.

La figura 22 de color rojo representa las profundidades de PAR del punto WG para el ciclo de mayo 2014 a abril 2015

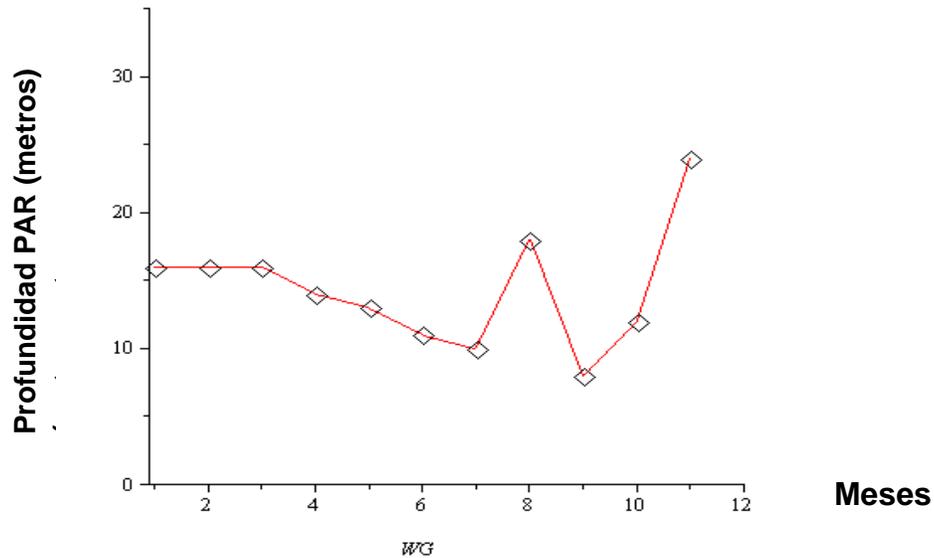


Figura 22. Media móvil en WG durante el ciclo de mayo 2014 a abril 2015

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

***Nota:** La memoria de cálculo y los comandos para la el calculo de la media móvil, el promedio, el promedio proyectado y la predicción al mes de mayo de 2015 se presentan con mayor detalle en anexos

En la figura 23 la línea de color negro representa la media móvil predicha con un alcance de 2 meses hacia atrás. Es decir, el valor predicho se obtuvo con los dos valores anteriores. Tanto las medidas reales (línea roja) como las medidas predichas tienen el mismo comportamiento por lo que se evidencia que el modelo propuesto tiene un comportamiento de predicción bastante cercano a los valores reales.

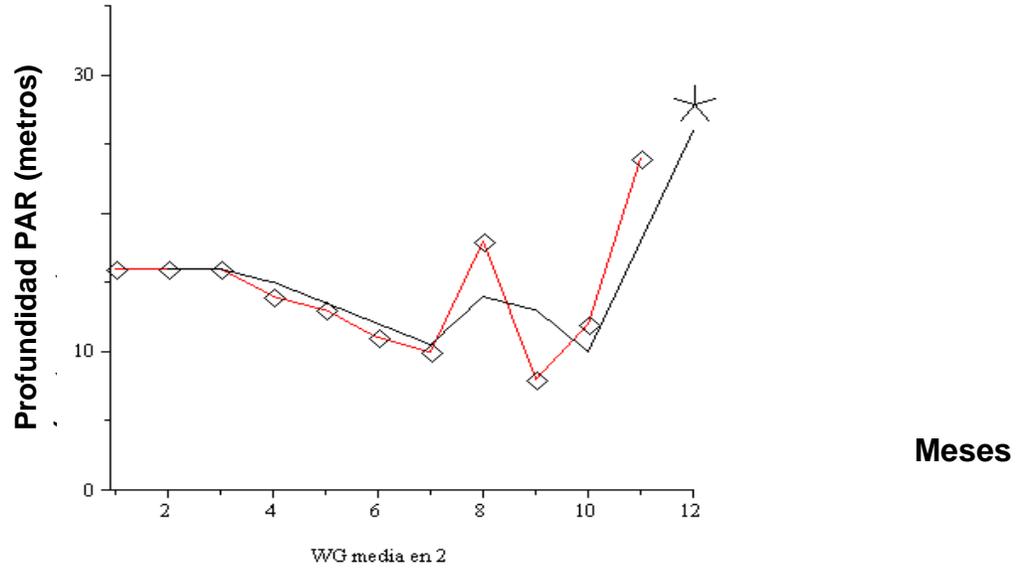


Figura 23. Predicción con un alcance de 2, punto WG

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

En la figura 24, la línea de color azul representa la media móvil con un alcance de 3 meses hacia atrás.

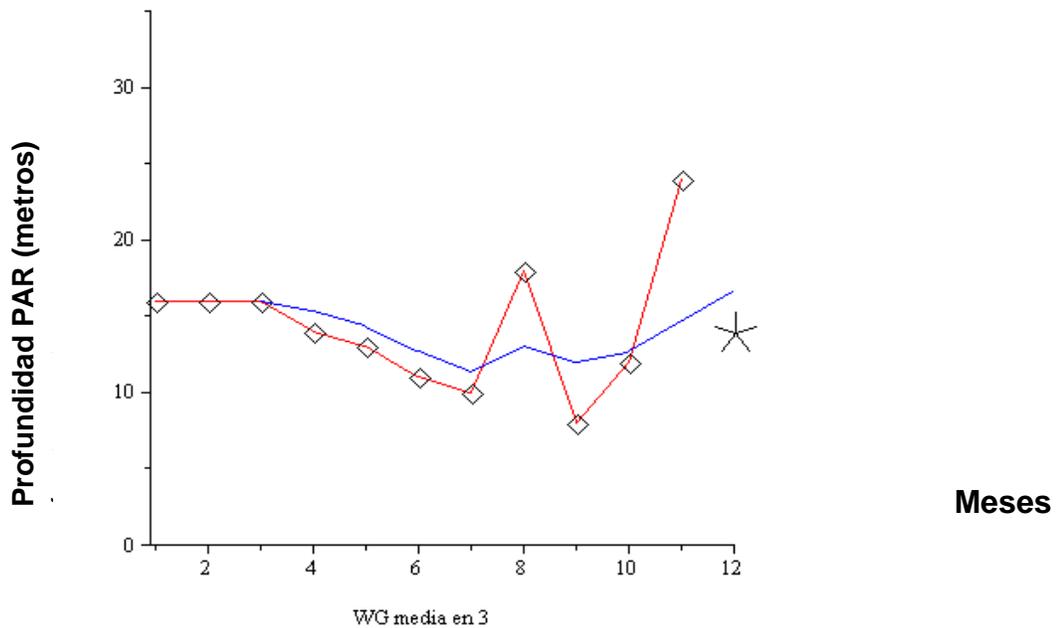


Figura 24. Predicción con un alcance de 3, punto WG

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

En la figura 25, la línea de color verde representa la media móvil con un alcance de 4 meses hacia atrás.

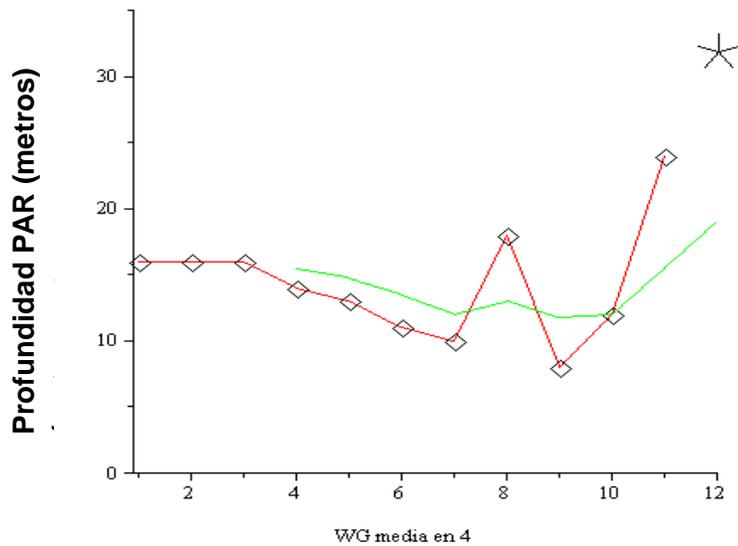


Figura 25. Predicción con un alcance de 4, punto WG

Meses

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

En la figura 26 la línea de color amarillo representa la media móvil con un alcance de 5 meses hacia atrás.

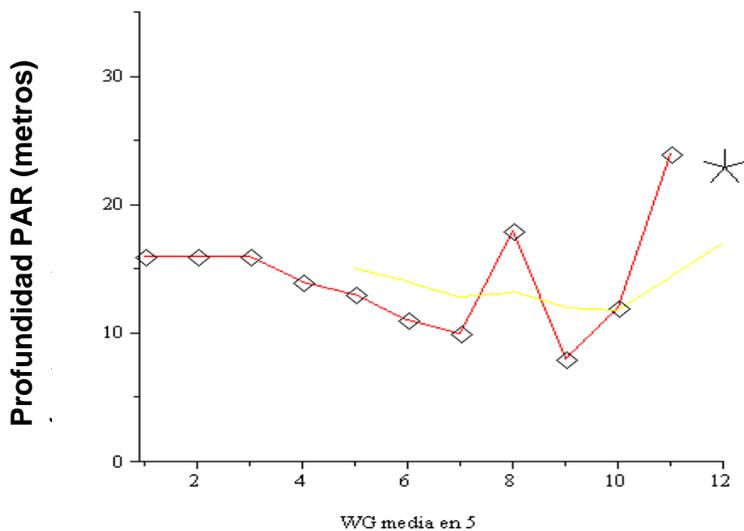


Figura 26. Predicción con un alcance de 5, punto WG

Meses

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

En la figura 27 la línea de color morado representa la media móvil con un alcance de 6 meses hacia atrás, es decir el valor de predicción fue calculado con las seis mediciones anteriores.

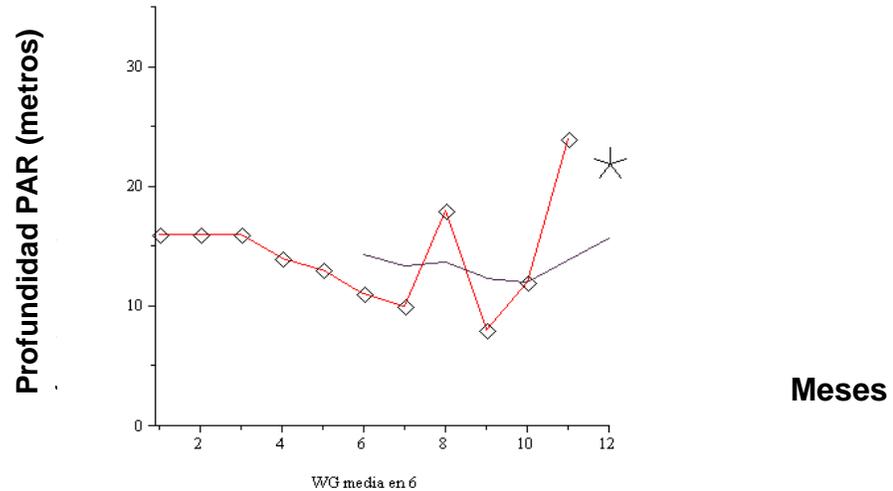


Figura 27. Predicción con un alcance de 6, punto WG

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

En la figura 28 la línea de color rosado representa la media móvil con un alcance de 7 meses hacia atrás.

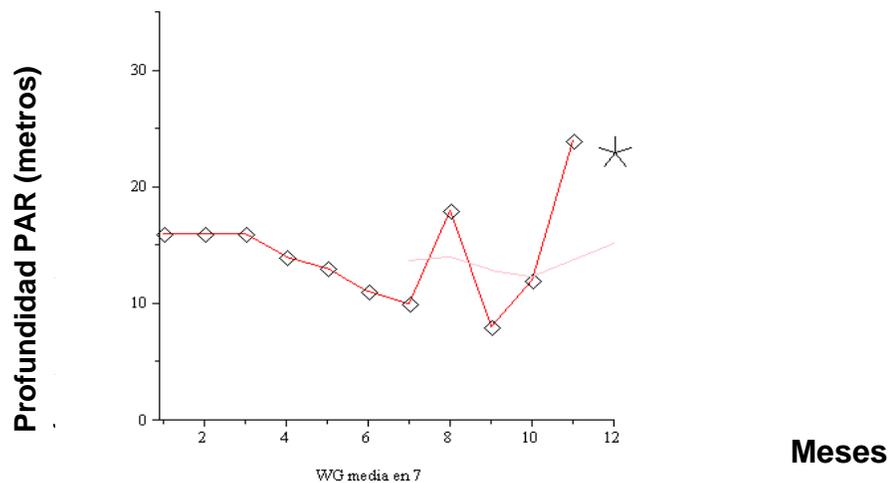


Figura 28. Predicción con un alcance de 7, punto WG

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

La línea de color corinto de la figura 29 representa la media móvil con un alcance de 8 meses hacia atrás.

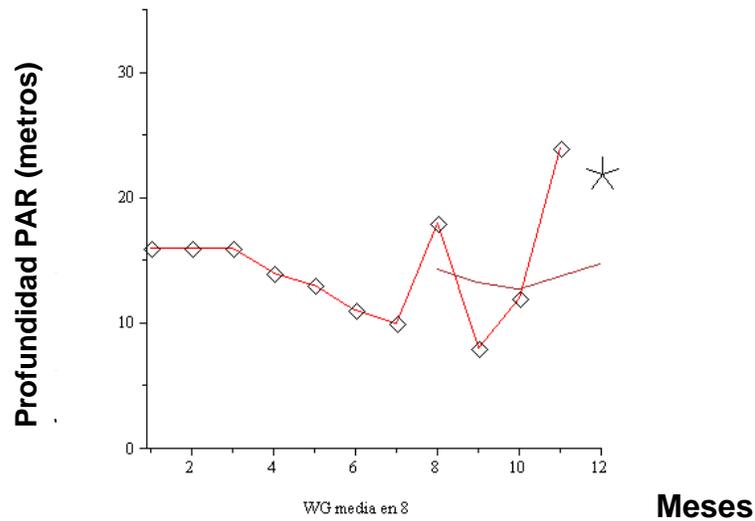


Figura 29. Predicción con un alcance de 8, punto WG

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

La línea de color gris de la figura 30 representa la media móvil con un alcance de 9 meses hacia atrás.

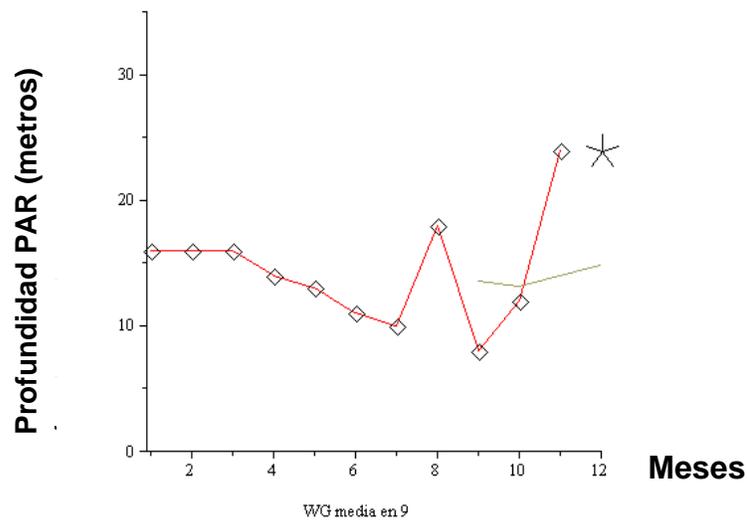


Figura 30. Predicción con un alcance de 9, punto WG

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

La línea de color celeste en la figura 31 representa la media móvil con un alcance de 10 meses hacia atrás.

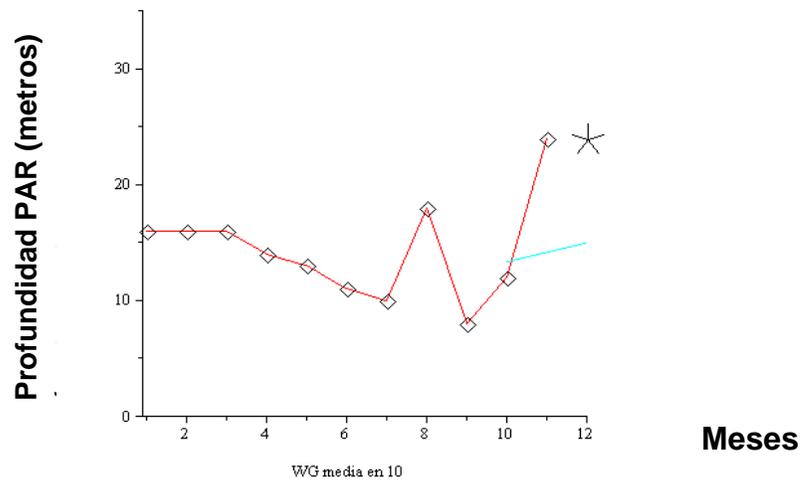


Figura 31. Predicción con un alcance de 10, punto WG

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

La línea de color rojo en la figura 32 representa la media móvil del punto WC, esta predicción es solamente el promedio. Debido a que hay únicamente 11 puntos hacia atrás, sólo se puede calcular un promedio, en la figura aparece sólo un círculo de color gris y no un segmento de recta.

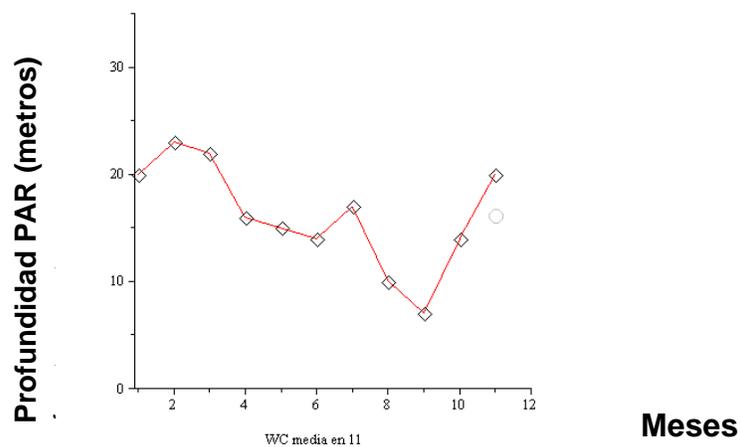


Figura 32. Predicción con un alcance de 11, punto WC

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

En la figura 33 se encuentran todas las medias móviles unificadas con un alcance de 2 a 11 en el punto WG.

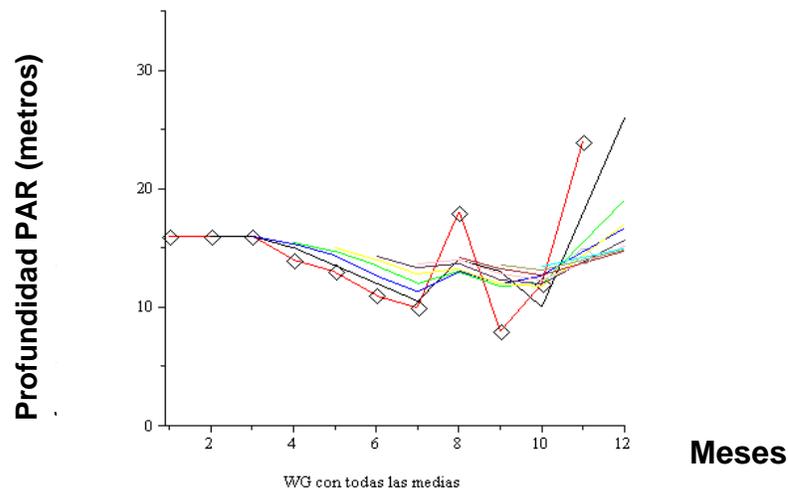


Figura 33. Medidas móviles de 2 a 11 en el punto WG

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

En la figura 34 se encuentran todas las predicciones según la media móvil de 2 a 10 del punto WG. Sería interesante comparar las medidas reales obtenidas con la sonda multiparamétrica en el décimo tercer mes que corresponde a mayo de 2015 con las medidas predictivas del modelo matemático creado para analizar ampliamente el uso e importancia que podría tener la utilización del modelaje matemático en el estudio del ecosistema acuático, ya que los datos de atenuación de la luz se siguen generando y la base de datos sigue creciendo mes a mes. De esta forma los sistemas de modelación creados para el lago de Atitlán podrían enriquecerse de tal forma que serán cada vez más útiles y mejor desarrollados para la obtención de información concluyente en el estudio y análisis del ecosistema.

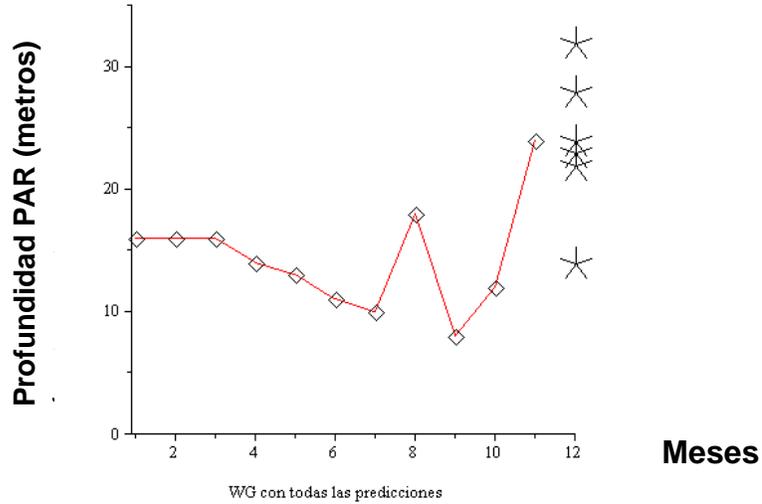


Figura 34. Predicciones de 2 a 10 en el punto WG

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

El mismo calculo se realizó para los ocho sitios muestreados en el lago de Atitlán como ejemplo se muestra en la figura 35 donde está la media móvil calculada con un alcance de 3 puntos hacia atrás para predecir el valor promedio que se obtendría en el siguiente mes, que corresponde a mayo de 2015 en el punto WC.

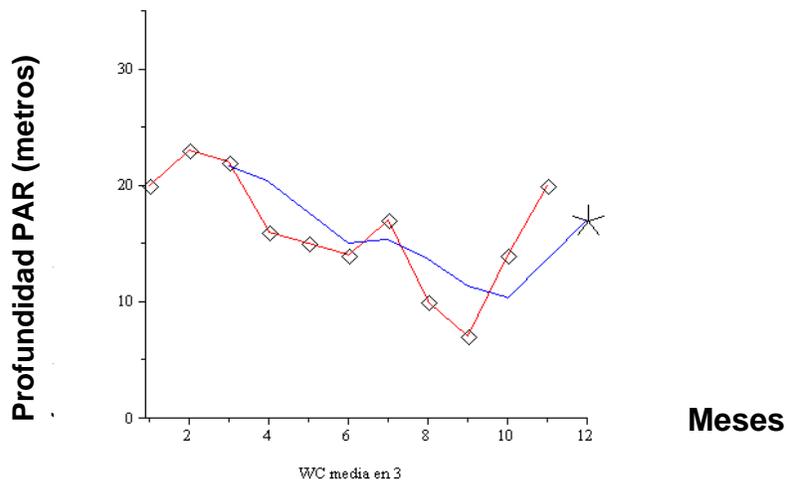


Figura 35. Media móvil para el punto WC

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

En la figura 36 se encuentran todas las medias móviles de 2 a 11 juntas del punto WC.

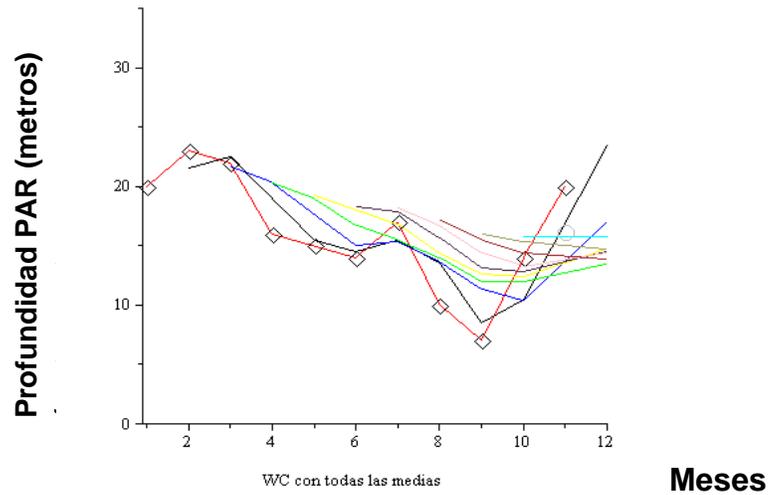


Figura 36. Medias móviles de 2 a 10 para el punto WC

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

En la figura 37 se encuentran todas las predicciones según la media móvil de 2 a 10 del punto WC. El procedimiento para calcular esta grafica fue el mismo que se utilizó para la el punto WG.

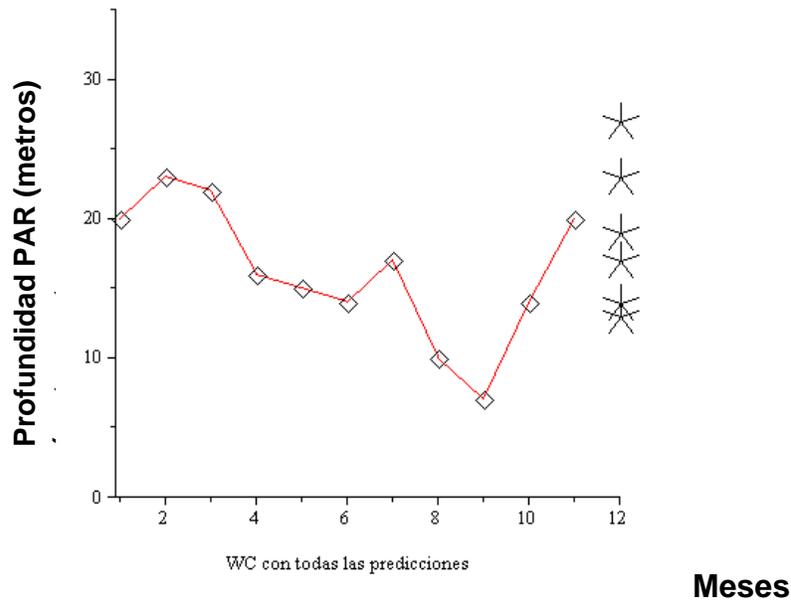


Figura 37. Predicciones de 2 a 10 en el punto WC

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y MAPLEsoft™

En el cuadro 5 se observan los valores de decaimiento K_d característico de la atenuación de la luz. Se evidencian valores altos extremos de K_d como por ejemplo 0.52 y 0.53 en febrero de 2015 en los puntos WG y W14 respectivamente obteniendo características de un lago turbio o en estado eutrófico y también se observan valores extremos bajos de K_d de 0.11 y 0.12 en WB y WA respectivamente, ambos en el mes de abril de 2015, estos valores son característicos de un lago claro u oligotrófico. Sin embargo, en promedio la mayoría de los valores obtenidos están alrededor de 0.26, que es el valor utilizado para clasificar al Lago de Atitlán como un lago típico o mesotrófico, basado en los promedios de K_d obtenidos.

Según los valores de K_d obtenidos se observan valores de un lago que hace pocos años podía considerarse claro y oligotrófico. Sin embargo, existe también la tendencia de algunos datos a acercarse a los parámetros de decaimiento de un lago eutrófico, algunos de los valores obtenidos hacen evidente la transición de un lago mesotrófico a uno eutrófico. En general, el Lago de Atitlán se encuentra catalogado como un lago típico o mesotrófico y todas las actividades que se realicen en el futuro en lago y su cuenca serán decisivas para definir la claridad del agua en el ecosistema.

Los datos obtenidos indican la situación vulnerable en la que se encuentra el lago, y actividades enfocadas a la recuperación del impacto negativo que todas las actividades antropogénicas generan alrededor del lago harán que el lago recupere sus características naturales de un lago claro y oligotrófico con las que contaba hace apenas algunos años o por el contrario si no se toman medidas ahora la tendencia será de disminuir la claridad del agua y llegar a tener las características de un lago totalmente eutrófico y turbio.

La fórmula simplificada utilizada para el cálculo de K_d para cantidades de datos muy grandes se encuentra en la figura 43 en Anexos.

Cuadro 4. Factor de decaimiento K_d o tasa porcentual continua

	WA	WB	WP	WC	WD	WE	W14	WG
Mayo	0.21	0.20	0.24	0.14	0.17	0.28	0.26	NM
Junio	0.21	0.24	0.37	0.19	0.21	NM	0.24	0.24

Julio	0.17	0.16	NM	0.16	0.17	0.29	0.35	0.25
Agosto	0.23	0.23	0.30	0.16	NM	0.27	0.34	0.28
Septiembre	0.24	0.26	0.31	0.27	0.27	0.31	NM	0.29
Octubre	0.28	0.30	0.31	0.29	0.32	0.31	0.41	0.31
Noviembre	0.27	0.26	0.25	0.30	0.32	0.34	0.43	0.37
Diciembre	0.27	0.28	0.21	0.24	0.27	0.40	0.49	0.35
Enero	0.30	0.21	0.21	0.47	0.36	0.35	0.46	0.25
Febrero	0.30	0.32	0.37	0.45	0.33	0.36	0.53	0.52
Marzo	0.32	0.25	0.26	0.30	0.36	0.37	0.30	0.29
Abril	0.12	0.11	0.13	0.13	0.15	0.14	0.19	0.13
Promedio	0.24	0.26	0.27	0.26	0.27	0.31	0.36	0.30

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo

En las figuras 38 y 39 se observa de manera gráfica los valores de la zona fótica en el lago de Atitlán. La figura 38 corresponde al promedio de todas las medidas en el ciclo anual medido. Como puede observarse la bahía de Santiago Atitlán es una de las zonas que muestra menores valores de profundidad PAR (zona azul oscuro) durante todo el año probablemente por el impacto antropogénico de los pobladores a su alrededor, así como características específicas en ese punto. De igual forma la bahía de San Lucas, aunque menos turbia, mientras que la zona norte del lago es la zona más clara probablemente por las altas profundidades que alcanza esa área del lago, presentando los valores más altos de profundidad PAR (celeste/blanco). La escala utilizada es la misma para las figuras 37 y 38. La figura 39 muestra específicamente el mapa de la zona fótica para las medidas de cada mes durante el ciclo anual de abril 2014 a mayo 2015.

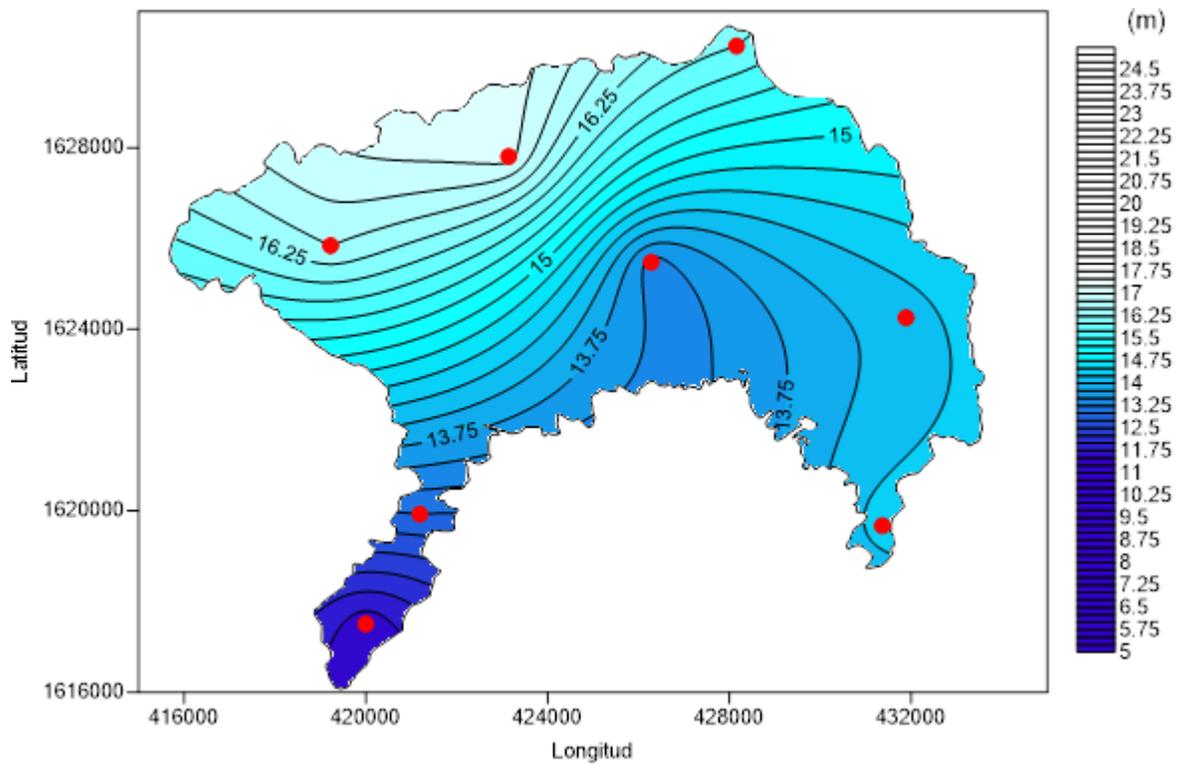
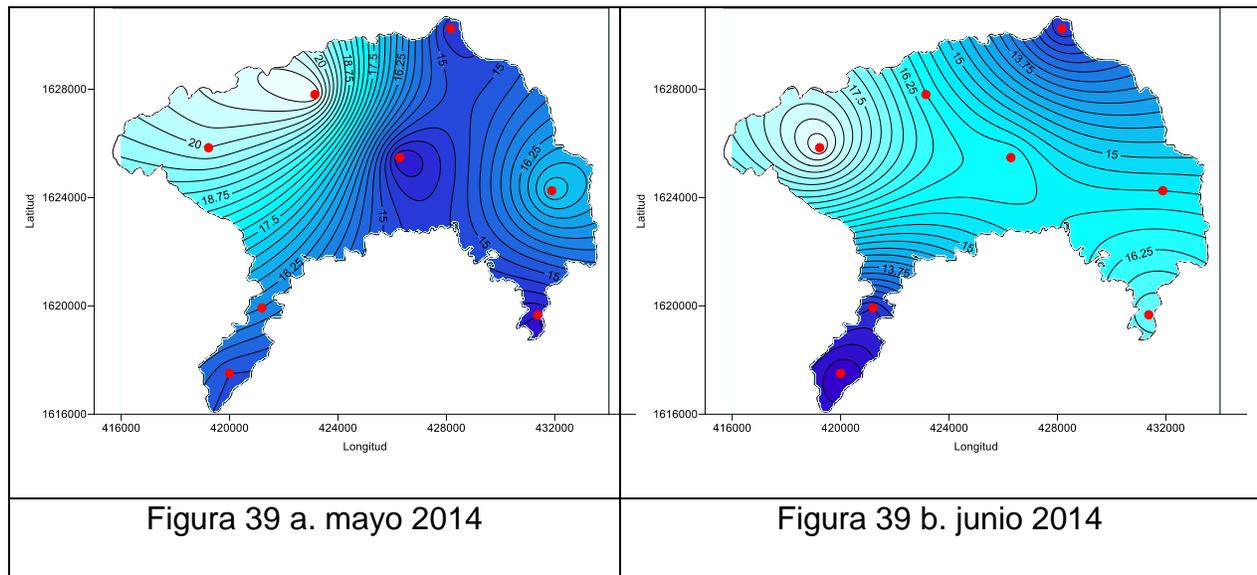


Figura 38. Valores promedio de la zona fótica por punto de muestreo de mayo 2014 a abril 2015, en el Lago de Atitlán.

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y SURFER ®



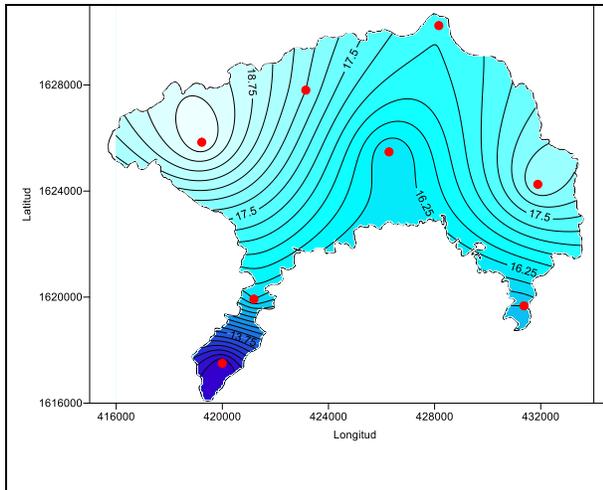


Figura 39 c. julio 2014

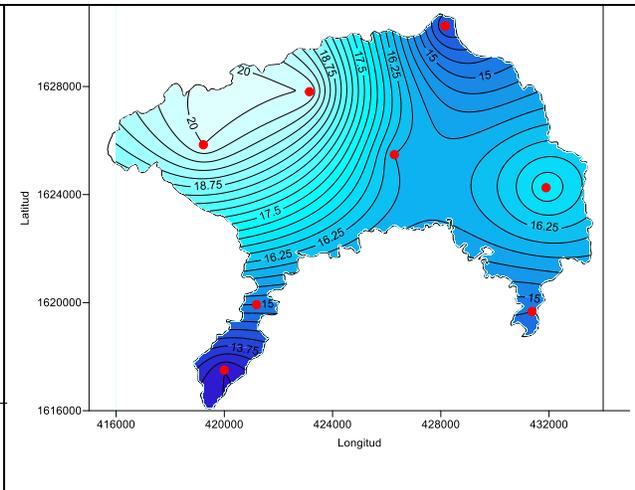


Figura 39 d. agosto 2014

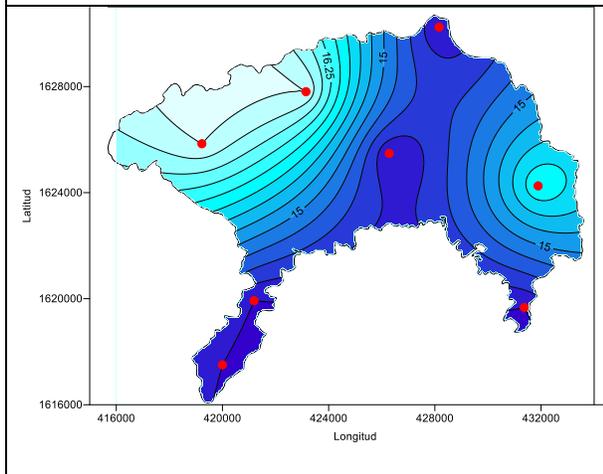


Figura 39 e. septiembre 2014

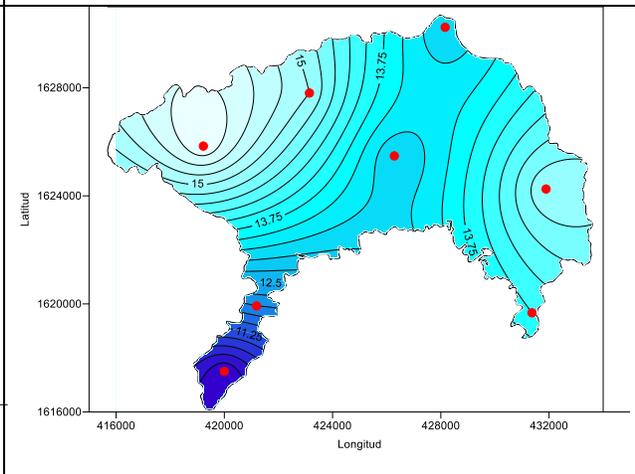


Figura 39 f. octubre 2014

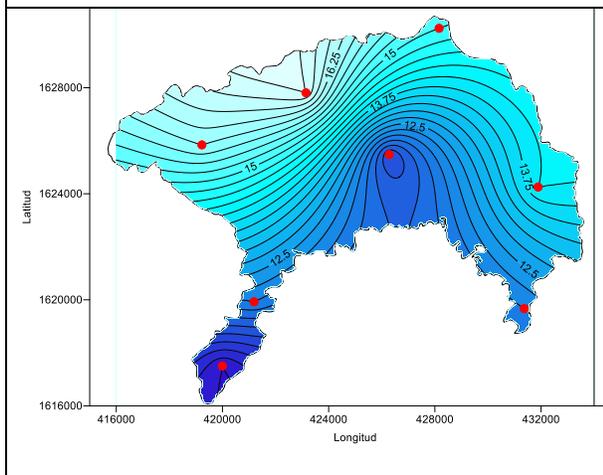


Figura 39 g. noviembre 2014

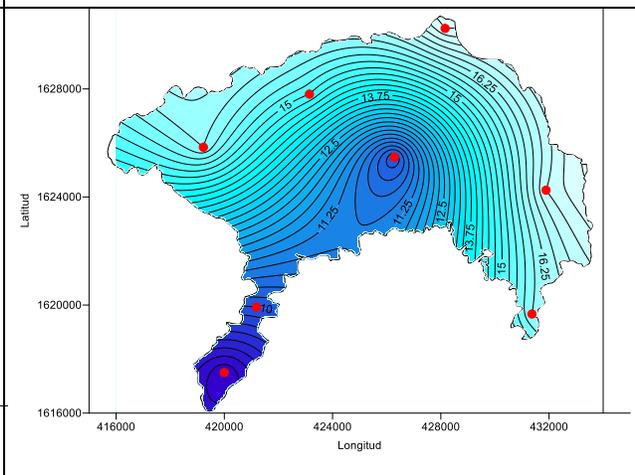


Figura 39 h. diciembre 2014

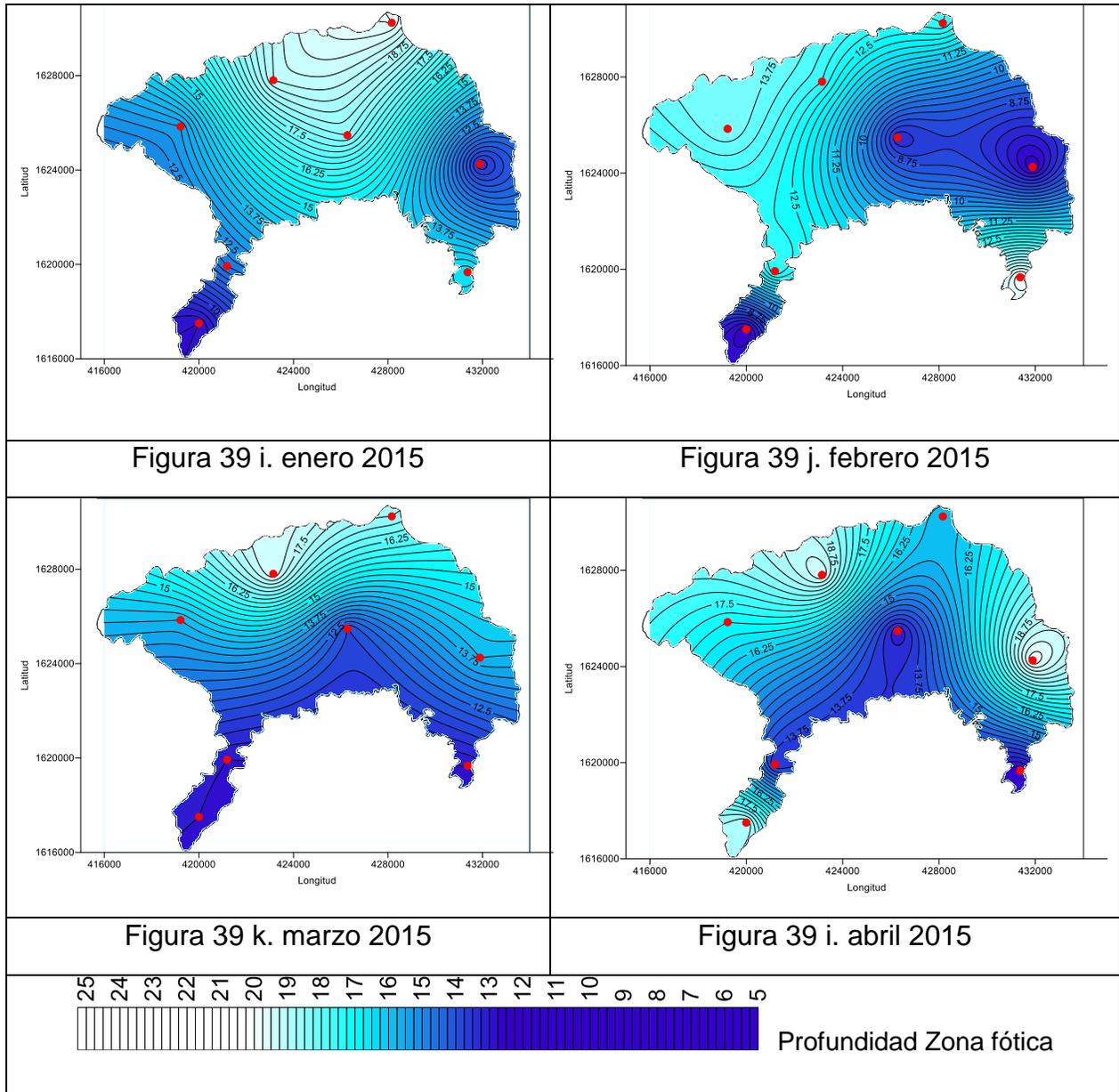


Figura 39 a - 39 i. Valores promedio de zona fótica (m) mensuales por punto de muestreo en el Lago de Atitlán.

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo y SURFER ®

VIII. CONCLUSIONES

- Se determinó el comportamiento de la luz solar y su relación con el ecosistema acuático del lago de Atitlán, obteniendo la metodología para la elaboración de los modelos de predicción, delimitando la zona fótica, la comparación de las medidas de la profundidad Secchi y profundidad PAR, así como los factores de decaimiento K_d en ocho sitios muestreados durante un año, de mayo de 2014 a abril de 2015.
- Se delimitó la zona fótica en ocho sitios de muestreo del lago de Atitlán en donde se evidenció que en todos los puntos muestreados la radiación solar se atenuó antes de alcanzar los 30 metros de profundidad, obteniendo el valor más alto en el punto WA en abril de 2015 donde se obtuvo 29 metros, y el valor más bajo obtenido a 7 metros en el punto WC y W14 en febrero de 2015. Por lo que el lago de Atitlán se puede clasificar como un lago mesotrófico o típico en base al promedio de la zona fótica.
- Se obtuvieron los valores de decaimiento K_d que es una característica de la atenuación de la luz. Los valores más altos de K_d obtenidos fueron de 0.52 y 0.53, ambos correspondientes al mes de febrero de 2015 en los puntos W14 y WG respectivamente, que son valores característicos de un lago en estado trófico. El valor más bajo observado fue en abril 2015 en el punto WB con un K_d de 0.11 que es característico de un lago oligotrófico. Sin embargo, el promedio de K_d obtenido de todas las mediciones fue de 0.26, valor que cataloga al lago de Atitlán como un lago mesotrófico o típico.
- Se encontró una baja correlación entre los datos de PAR de 0 a 20 metros y las medidas del disco Secchi utilizando un modelo de regresión lineal. El factor de conversión obtenido PAR a Secchi fue de 0.420 para época seca y lluviosa y un coeficiente de correlación de 0.2955 que es bajo para poder utilizar el factor de conversión y utilizar medidas de Secchi anteriores.

- Se diseñó el modelo matemático para realizar predicciones del comportamiento de la luz en los ocho puntos de muestreo durante un año en el lago de Atitlán, sin embargo, se tienen muy pocos datos para que la precisión del modelo permita en ese momento la toma de decisiones sea adecuada. Al contar con un mayor número de datos con ciclos definidos se podrá realizar el mismo procedimiento con mayor exactitud, haciendo el modelo más preciso y útil para la toma de decisiones y generación de medidas preventivas y de mitigación
- El presente trabajo aportó el protocolo del manejo adecuado de la información para la creación de modelos matemáticos que puedan predecir datos, ya que fue posible convertir la información que brinda la sonda multiparamétrica en información que fue de beneficio para la mejor comprensión del funcionamiento de la luz en el lago de Atitlán.

IX. RECOMENDACIONES

- Continuar los muestreos de profundidad PAR con la sonda multiparamétrica para la obtención de un mayor número de datos que permita seguir modelando matemáticamente y realizar predicciones con mayor precisión sobre el comportamiento de la atenuación de luz en el ecosistema acuático del lago de Atitlán.
- Realizar monitoreos aleatorios en varios puntos estratégicos distintos a los puntos que ya se determinaron tratando de abarcar todo el espejo de agua del lago de Atitlán.
- Incluir en el modelo matemático otras variables como factores bióticos y abióticos del lago de Atitlán que incluyan calidad del agua, datos meteorológicos, niveles de clorofila, entre otros con el objetivo de incluir en el mismo las variables que influyen directamente en las predicciones del comportamiento de la luz.
- Se recomienda realizar este tipo de investigaciones en otros lagos de Guatemala ya que entender la atenuación de luz en los ecosistemas acuáticos es un complemento que, en conjunto con estudios químicos, biológicos, geológicos y meteorológicos, entre otros, ayudarán a brindar soluciones integrales en el futuro para la conservación ecológica de los ecosistemas acuáticos

X. BIBLIOGRAFIA

- Ackleson, S. G., Balch, W. M., y Holligan, P. M. (1994). Response of water-leaving radiance to particulate calcite and chlorophyll a concentration: A model for Gulf of Maine coccolithophore blooms [Electronic Version]. *Journal of Geophysical Research*, C4 (99), 7483–7499. Doi: 10.1029/93JC02150
- Armengol, J., Caputo, L., Comerma, M., Feijoó, C., García J.C., Marcé, R. (s.f.) Sau reservoir s light climate: relationships between Secchi Depth and light extinction coefficient. 195-210
- Advanced ProSer, S.L. (2012). *Adhesivos Fotoiniciados*. Recuperado el 01 de octubre de 2013 de: <http://www.advancedproser.com/default.asp?ild=KDKDK>
- Atkins, W. R. G. y Poole, H. H. (1952). An experimental study of the scattering of light by natural waters [Electronic version]. *Proceedings of the Royal Society, Biological Sciences*, 900 (140), 321–338. Doi: 10.1098/rspb.1952.0064
- Chang, G., J. (2009). Limnología Capitulo 3. Escuela Superior Politécnica, Facultad de Ingeniería Marítima. Guayaquil. Recuperado el 16 de octubre de 2016 de: <http://slideplayer.es/slide/1021839/>
- Dix, M., Dix, Symonds, Cabrera, Toledo y Orozco. (2010). Estado físico, químico, biológico del Lago de Atitlán, octubre 2009 a diciembre 2010: Centro de Estudios Atitlán. Laboratorio de Análisis y Monitoreo. Universidad del Valle de Guatemala.
- Dix, M., Dix, Symonds, Cabrera, Toledo y Orozco. (2012). Estado físico, químico, biológico del Lago de Atitlán, octubre 2009 a diciembre 2010: Centro de Estudios Atitlán. Laboratorio de Análisis y Monitoreo. Universidad del Valle de Guatemala.
- Fabelinskii, I. L. (1968). Molecular scattering of light. New York: Plenum Press.
- Frankovich, T.A., Rudnick, D.T., Fourqurean, J.W. (2017). Light Attenuation in estuarine mangrove lakes. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 184, 191-201

- Graham, J (s.f.). Secchi disk observations and extinction coefficients in the central and eastern north Pacific Ocean. U.S. of bureau of Commercial Fisheries Biological Laboratories: Maine.
- Idso, S.B., Gilbert, G. (1974). On the universality of the Poole and Atkins Secchi disk-light equation. *Journal of Applied Ecology*. 11(1), 399-401.
- Jonasz, M., Georges, R. F. (2007). Light Scattering by Particles in Water. Theoretical and Experimental Foundations. Londres: Elsevier.
- Koenings, J.P., Edmundson, J.A. (1991). Secchi disk and photometer estimates of light regimes in Alaskan lakes: effects of yellow color and turbidity. *Limnology Oceanography*. 36(1), 91-105.
- Majozi, N.P. (2011). *Remote Sensing of Euphotic Depth in Lake Naivasha* (Tesis de Maestría). Universidad de Twente, Holanda.
- Read, J., Rose, K.C., Winslow, L. A. Read, E.K. (2015). A method for estimating the diffuse attenuation coefficient (K_d /PAR) from paired temperature sensors. *Limnology and Oceanography: Methods*, 13, 52-61.
- Roldán P. G., Ramírez, R. J. (2008). Fundamentos de limnología Neotropical. Segunda Edición. Colombia: Editorial Universidad de Antioquia. 529 páginas.
- Rose, K.C., Williamson, C.E., Schladow, S.F., Winder, M., & Oris, J.T. (2009). Patterns of spatial and temporal variability of UV transparency in Lake Tahoe, California, Nevada. *Journal of geophysical research*. 114, 1-9. Doi: 10.1029/2008JG00016
- Scheffer, M. (1998). Ecology of Shallow lakes. Netherlands: Kluwer Academic Publishers
- Shibata K. (1958). Spectrophotometry of intact biological materials: absolute and relative measurements of their transmission, reflection and absorption spectra [Electronic version]. *Journal of Biochemistry*. 45, 599–623.

Song, K., Ma, J., Wen, Z., Fang, C., Shang, Y., Zhao, Y., Wang, M., Du, J. (2017) Remote estimation of K_d (PAR) using MODIS and Landsat imagery for turbid inland waters in Northeast China. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 123, 159-172.

Tyler, J.E. (1968). The Secchi Disc. *Limnology and Oceanography*. Vol 13, 1-6.

Wang, L., Hu, B., Kisi, O., Kermani, M.Z., Gong, W. (2017). Prediction of diffuse photosynthetically active radiation using different soft computing techniques. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143, 2235-2244

WildCat Lighting. (s.f.). *Water Penetration Chart*. Disponible en:
http://www.wildcatlighting.com/Light_Chart.html

Wetzel, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystem*. Tercera Edición. Academic Press. 1006 páginas.

ANEXOS



UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
 FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS
 LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES
PROYECTO: “ATENUACIÓN DE LA LUZ SOLAR EN EL ECOSISTEMA ACUÁTICO DEL LAGO DE ATITLÁN”

Estación:	Fecha:	Hora inicial:	Hora Final:	Temperatura:	% de Humedad:

VARIABLE	INICIAL	FINAL	PROMEDIO
Visibilidad con el disco Secchi			

Responsable de la medición: _____

CONDICIONES AMBIENTALES

CONDICIÓN	BASTANTE	POCO	NADA
SOLEADO			
LLUVIOSO			
SECO			
NIEBLA			
PRESENCIA DE SÓLIDOS EN EL AGUA			
OTROS			

Observaciones:

Figura 40. Hoja de campo utilizada en los monitoreos en el lago de Atitlán

Fuente: Elaboración propia

Cuadro 5. Comparación de la profundidad Secchi y la zona fótica

Estación	Oeste	Norte	Fecha	PAR %	Disco Secchi (m)	Zona Fótica (m)
WA	419225	1625842	May-14	1.171783	7	20
WA	419225	1625842	Jun-14	1.10709	9.5	19
WA	419225	1625842	Jul-14	1.163757	6.5	NM
WA	419225	1625842	Aug-14	1.012231	8.1	20
WA	419225	1625842	Sep-14	1.098066	7	17
WA	419225	1625842	Oct-14	1.139295	6	16
WA	419225	1625842	Nov-14	1.163793	7.1	16
WA	419225	1625842	Dec-14	1.109314	6	16
WA	419225	1625842	Jan-15	1.188281	6	13
WA	419225	1625842	Feb-15	1.112235	6	14
WA	419225	1625842	Mar-15	1.37401	6.1	14
WA	419225	1625842	Apr-15	1.071174	9	NM
WB	423145	1627806	May-14	1.181684	7.5	21
WB	423145	1627806	Jun-14	1.042248	8.5	16
WB	423145	1627806	Jul-14	1.153374	6.7	NM
WB	423145	1627806	Aug-14	1.053135	8.2	20
WB	423145	1627806	Sep-14	1.152482	6.5	17
WB	423145	1627806	Oct-14	1.289336	5	15
WB	423145	1627806	Nov-14	1.084645	7	17
WB	423145	1627806	Dec-14	1.140521	6.5	15
WB	423145	1627806	Jan-15	1.149006	7	19
WB	423145	1627806	Feb-15	1.171113	5	13
WB	423145	1627806	Mar-15	1.002828	6.9	18
WB	423145	1627806	Apr-15	1.132803	10.1	NM
WP	428159	1630240	Jun-14	1.573187	4	12
WP	428159	1630240	Jul-14	1.22449	7	17
WP	428159	1630240	Aug-14	1.164822	5.6	14
WP	428159	1630240	Sep-14	1.649647	5	14
WP	428159	1630240	Oct-14	1.317425	4.5	13
WP	428159	1630240	Nov-14	1.238579	5.5	15

WP	428159	1630240	Dec-14	1.342282	6.1	NM
WP	428159	1630240	Jan-15	1.059603	8	20
WP	428159	1630240	Mar-15	1.00205	7	17
WP	428159	1630240	Apr-15	1.176471	8	NM
WC	431889	1624253	Jun-14	1.017536	4	NM
WC	431889	1624253	Jul-14	1.088435	7	NM
WC	431889	1624253	Aug-14	1.164822	5.6	NM
WC	431889	1624253	Sep-14	1.649647	5	16
WC	431889	1624253	Oct-14	1.317425	4.5	15
WC	431889	1624253	Nov-14	1.238579	5.5	14
WC	431889	1624253	Dec-14	1.342282	6.1	17
WC	431889	1624253	Jan-15	1.059603	8	10
WC	431889	1624253	Feb-15	1.376281	4.9	7
WC	431889	1624253	Mar-15	1.151531	7	14
WC	431889	1624253	Apr-15	1.027788	9.7	20
WD	431368	1619669	Jun-14	1.155268	7	17
WD	431368	1619669	Jul-14	1.137225	8.5	NM
WD	431368	1619669	Sep-14	1.325381	5.6	14
WD	431368	1619669	Oct-14	1.043705	5.5	14
WD	431368	1619669	Nov-14	1.207605	7.3	12
WD	431368	1619669	Dec-14	1.023891	6.2	16
WD	431368	1619669	Jan-15	1.715686	5	15
WD	431368	1619669	Feb-15	1.015572	8.1	16
WD	431368	1619669	Mar-15	1.014799	6	11
WD	431368	1619669	Apr-15	1.143889	10.4	NM
WE	421190	1619924	May-14	1.042572	5.3	16
WE	421190	1619924	Jun-14	1.162791	5.5	12
WE	421190	1619924	Jul-14	1.416208	5.3	16
WE	421190	1619924	Aug-14	1.388051	5.1	15
WE	421190	1619924	Sep-14	1.604412	6.5	14
WE	421190	1619924	Oct-14	1.498127	5.1	12
WE	421190	1619924	Nov-14	1.226415	5.8	12
WE	421190	1619924	Dec-14	1.555465	4	10
WE	421190	1619924	Jan-15	1.107215	5.5	12

WE	421190	1619924	Feb-15	1.069665	5.29	13
WE	421190	1619924	Mar-15	1.05755	5.2	11
WE	421190	1619924	Apr-15	1.065483	7.1	NM
W14	419998	1617504	May-14	1.149176	5.5	15
W14	419998	1617504	Jun-14	1.055341	5	11
W14	419998	1617504	Jul-14	1.197474	6	12
W14	419998	1617504	Aug-14	1.258741	5	13
W14	419998	1617504	Sep-14	1.31678	5.8	14
W14	419998	1617504	Oct-14	1.187303	4.8	10
W14	419998	1617504	Nov-14	1.150188	5.4	10
W14	419998	1617504	Dec-14	1.595442	4	8
W14	419998	1617504	Jan-15	1.112998	4.8	9
W14	419998	1617504	Feb-15	1.403629	4.1	7
W14	419998	1617504	Mar-15	1.055873	4.2	11
W14	419998	1617504	Apr-15	1.140413	6.4	19
WG	426282	1625477	Jun-14	1.27679	9	16
WG	426282	1625477	Jul-14	1.211632	6.6	16
WG	426282	1625477	Aug-14	1.187905	9	16
WG	426282	1625477	Sep-14	1.120649	5.9	14
WG	426282	1625477	Oct-14	1.833977	5.2	13
WG	426282	1625477	Nov-14	1.19653	6.2	11
WG	426282	1625477	Dec-14	1.120114	6.5	10
WG	426282	1625477	Jan-15	1.201373	8	18
WG	426282	1625477	Feb-15	1.382114	4	8
WG	426282	1625477	Mar-15	1.051577	6.5	12
WG	426282	1625477	Apr-15	1.156725	12	

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo

En el cuadro 6 se comparan los datos de profundidad PAR y las medidas de profundidad del disco Secchi encontrando una baja correlación entre estos datos, utilizando un modelo de regresión lineal. Esta regresión lineal fue realizada con los datos de profundidad PAR del metro 0 al metro 20. La medida de la profundidad del disco Secchi fue comparada con la profundidad en la cual se alcanza el 1% de la medida de la superficie. La coordenada al origen de la regresión lineal se fijó como 0.

Cuadro 6. Datos de profundidad PAR y la profundidad en metros para la correlación en el punto W14, mayo 2014.

Photosynthetically Active Radiation (PAR) $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	Profundidad (m)
4612	0.1
2941	0.5
2595	1
1210	2
1352	3
963	4
792	5
562	6
478	7
355	8
280	9
202	10
154	11
117	12
95	13
72	14
53	15
44	NM
35	17
26	18
19	19
14	20
10	21

6	22
2	23
1	24

Fuente: Datos experimentales obtenidos en campo

Profundidad máxima	225 m
Temperatura de servicio	-5 a 50 °C
Suministro de pilas (opcional)	8 pilas AA
Interfaces de ordenador	RS232, SDI-12 y RS485
Memoria (opcional)	120.000 medidas
Sensor de temperatura	
Rango de medicion	-5 a 50 °C
Precisión	± 0,10 °C
Resolución	0,01 °C
Sensor de conductancia específica	
Rango de medicion	0 a 100 mS/cm
Precisión	± 1% del valor leído; ± 0,001 mS/cm
Resolución	0,0001 unidades
Sensor de pH	
Rango	0 a 14 unidades
Precisión	± 0,2 unidades
Resolución	0,01 unidades

Figura 41. Especificaciones técnicas sonda multiparamétrica Hydrolab OTT DS5

Fuente: Manual de la sonda Hydrolab

with(plots) : d := <1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11> :

c := <16, 16, 16, 14, 13, 11, 10, 18, 8, 12, 24> :

plot(d, c, view = [1 ..12, 0 ..35]) :

pointplot(d, c, symbolsize = 25) :

A := plot(d, c, view = [1 ..12, 0 ..35]) :

B := pointplot(d, c, symbolsize = 25) :

m := 2 :

$$\text{avg2} := \left\langle \frac{c_1 + c_2}{m}, \frac{c_2 + c_3}{m}, \frac{c_3 + c_4}{m}, \frac{c_4 + c_5}{m}, \frac{c_5 + c_6}{m}, \frac{c_6 + c_7}{m}, \frac{c_7 + c_8}{m}, \frac{c_8 + c_9}{m}, \frac{c_9 + c_{10}}{m}, \frac{c_{10} + c_{11}}{m}, 2 \cdot \frac{c_{10} + c_{11}}{m} - \frac{c_9 + c_{10}}{m} \right\rangle :$$

CI := pointplot(<12>, <2 · $\frac{c_{10} + c_{11}}{1} - \frac{c_9 + c_{10}}{1} - c_{11}$ >, symbolsize = 50, symbol = asterisk) :

C := plot(<2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12>, avg2, view = [1 ..12, 0 ..35], color = black) :

m := 3 :

$$\text{avg3} := \left\langle \frac{c_1 + c_2 + c_3}{m}, \frac{c_2 + c_3 + c_4}{m}, \frac{c_3 + c_4 + c_5}{m}, \frac{c_4 + c_5 + c_6}{m}, \frac{c_5 + c_6 + c_7}{m}, \frac{c_6 + c_7 + c_8}{m}, \frac{c_7 + c_8 + c_9}{m}, \frac{c_8 + c_9 + c_{10}}{m}, \frac{c_9 + c_{10} + c_{11}}{m}, 2 \cdot \frac{c_9 + c_{10} + c_{11}}{m} - \frac{c_8 + c_9 + c_{10}}{m} \right\rangle :$$

E1 := pointplot(<12>, <2 · $\frac{c_9 + c_{10} + c_{11}}{1} - \frac{c_8 + c_9 + c_{10}}{1} - c_{11} - c_{10}$ >, symbolsize = 50, symbol = asterisk) :

E := plot(<3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12>, avg3, view = [1 ..12, 0 ..35], color = blue) :

$m := 4 :$

$$\text{avg4} := \left\langle \frac{c_1 + c_2 + c_3 + c_4}{m}, \frac{c_2 + c_3 + c_4 + c_5}{m}, \frac{c_3 + c_4 + c_5 + c_6}{m}, \right. \\ \left. \frac{c_4 + c_5 + c_6 + c_7}{m}, \frac{c_5 + c_6 + c_7 + c_8}{m}, \frac{c_6 + c_7 + c_8 + c_9}{m}, \right. \\ \left. \frac{c_7 + c_8 + c_9 + c_{10}}{m}, \frac{c_8 + c_9 + c_{10} + c_{11}}{m}, 2 \cdot \frac{c_8 + c_9 + c_{10} + c_{11}}{m} \right. \\ \left. - \frac{c_7 + c_8 + c_9 + c_{10}}{m} \right\rangle :$$

$$F1 := \text{pointplot} \left(\langle 12 \rangle, \left\langle 2 \cdot \frac{c_8 + c_9 + c_{10} + c_{11}}{1} - \frac{c_7 + c_8 + c_9 + c_{10}}{1} - c_{11} - c_{10} \right. \right. \\ \left. \left. - c_9 \right\rangle, \text{symbolsize} = 50, \text{symbol} = \text{asterisk} \right) :$$

$F := \text{plot}(\langle 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 \rangle, \text{avg4}, \text{view} = [1 .. 12, 0 .. 35], \text{color} = \text{green}) :$

$m := 5 :$

$$\text{avg5} := \left\langle \frac{c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5}{m}, \frac{c_2 + c_3 + c_4 + c_5 + c_6}{m}, \frac{c_3 + c_4 + c_5 + c_6 + c_7}{m}, \right. \\ \left. \frac{c_4 + c_5 + c_6 + c_7 + c_8}{m}, \frac{c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9}{m}, \frac{c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10}}{m}, \right. \\ \left. \frac{c_7 + c_8 + c_9 + c_{10} + c_{11}}{m}, 2 \cdot \frac{c_7 + c_8 + c_9 + c_{10} + c_{11}}{m} \right. \\ \left. - \frac{c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10}}{m} \right\rangle :$$

$$G1 := \text{pointplot} \left(\langle 12 \rangle, \left\langle 2 \cdot \frac{c_7 + c_8 + c_9 + c_{10} + c_{11}}{1} - \frac{c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10}}{1} - c_{11} \right. \right. \\ \left. \left. - c_{10} - c_9 - c_8 \right\rangle, \text{symbolsize} = 50, \text{symbol} = \text{asterisk} \right) :$$

$G := \text{plot}(\langle 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 \rangle, \text{avg5}, \text{view} = [1 .. 12, 0 .. 35], \text{color} = \text{yellow}) :$

$m := 6 :$

$$\text{avg6} := \left\langle \frac{c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5 + c_6}{m}, \frac{c_2 + c_3 + c_4 + c_5 + c_6 + c_7}{m}, \right. \\ \left. \frac{c_3 + c_4 + c_5 + c_6 + c_7 + c_8}{m}, \frac{c_4 + c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9}{m}, \right. \\ \left. \frac{c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10}}{m}, \frac{c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10} + c_{11}}{m}, 2 \right. \\ \left. \cdot \frac{c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10} + c_{11}}{m} - \frac{c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10}}{m} \right\rangle :$$

$$H1 := \text{pointplot} \left(\langle 12 \rangle, \left\langle 2 \cdot \frac{c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10} + c_{11}}{1} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10}}{1} - c_{11} - c_{10} - c_9 - c_8 - c_7 \right\rangle, \text{symbolsize} = 50, \right. \\ \left. \text{symbol} = \text{asterisk} \right) :$$

$H := \text{plot}(\langle 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 \rangle, \text{avg6}, \text{view} = [1 ..12, 0 ..35], \text{color} = \text{violet}) :$

$m := 7 :$

$$\text{avg7} := \left\langle \frac{c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5 + c_6 + c_7}{m}, \frac{c_2 + c_3 + c_4 + c_5 + c_6 + c_7 + c_8}{m}, \right. \\ \left. \frac{c_3 + c_4 + c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9}{m}, \frac{c_4 + c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10}}{m}, \right. \\ \left. \frac{c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10} + c_{11}}{m}, 2 \cdot \frac{c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10} + c_{11}}{m} \right. \\ \left. - \frac{c_4 + c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10}}{m} \right\rangle :$$

$$J1 := \text{pointplot} \left(\langle 12 \rangle, \left\langle 2 \cdot \frac{c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10} + c_{11}}{1} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{c_4 + c_5 + c_6 + c_7 + c_8 + c_9 + c_{10}}{1} - c_{11} - c_{10} - c_9 - c_8 - c_7 - c_6 \right\rangle, \text{symbolsize} \right. \\ \left. = 50, \text{symbol} = \text{asterisk} \right) :$$

$J := \text{plot}(\langle 7, 8, 9, 10, 11, 12 \rangle, \text{avg7}, \text{view} = [1 ..12, 0 ..35], \text{color} = \text{pink}) :$

```

avg8 := < (c1 + c2 + c3 + c4 + c5 + c6 + c7 + c8) / m,
(c2 + c3 + c4 + c5 + c6 + c7 + c8 + c9) / m,
(c3 + c4 + c5 + c6 + c7 + c8 + c9 + c10) / m,
(c4 + c5 + c6 + c7 + c8 + c9 + c10 + c11) / m, 2,
(c4 + c5 + c6 + c7 + c8 + c9 + c10 + c11) / m,
- (c3 + c4 + c5 + c6 + c7 + c8 + c9 + c10) / m > :
K1 := pointplot ( < (12), < 2 * (c4 + c5 + c6 + c7 + c8 + c9 + c10 + c11) / 1,
- (c3 + c4 + c5 + c6 + c7 + c8 + c9 + c10) / 1 - c11 - c10 - c9 - c8 - c7 - c6 - c5 >,
symbolsize = 50, symbol = asterisk > :
K := plot ((8, 9, 10, 11, 12), avg8, view = [1 .. 12, 0 .. 35], color = brown) :

```

Figura 42. Memoria de cálculo y comandos para el cálculo de predicciones en el software MAPLEsoft ®

$$\begin{aligned}
& \Rightarrow \sum_{i=1}^n y_i - \bar{y} + \hat{\beta}(\bar{x} - x_i) = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}) = -\hat{\beta} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i) \\
& \Rightarrow \hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})} \\
& \Rightarrow \hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \frac{\text{Cov}(x, y)}{\text{Var}(x)} = X'X^{-1}X'y
\end{aligned}$$

Figura 43. Fórmula matemática simplificada para el cálculo de K_d .

*Las dimensionales de PAR de las figuras 44 a la 55 que se presentan a continuación están dadas en $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$

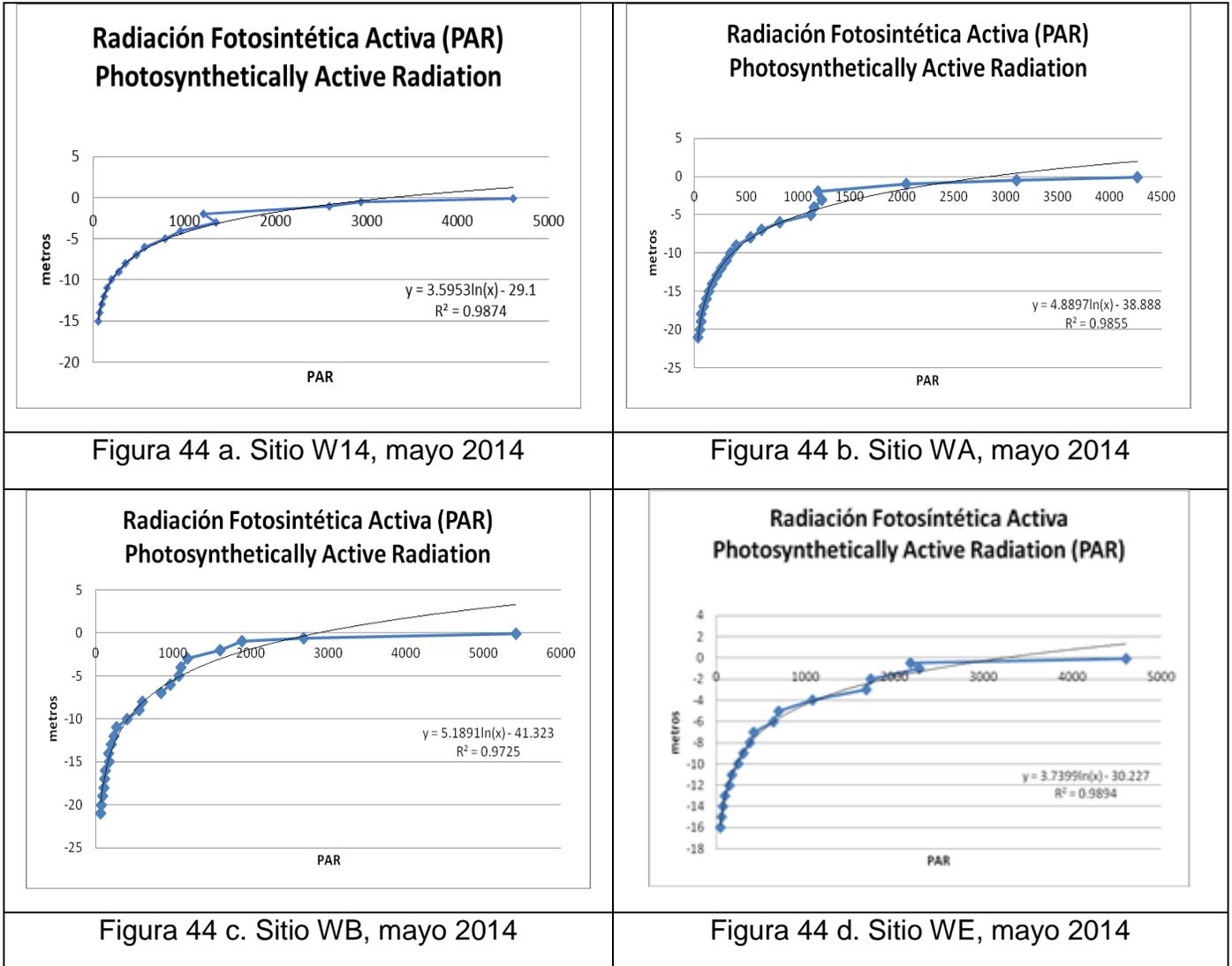


Figura 44. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época lluviosa, mayo 2014

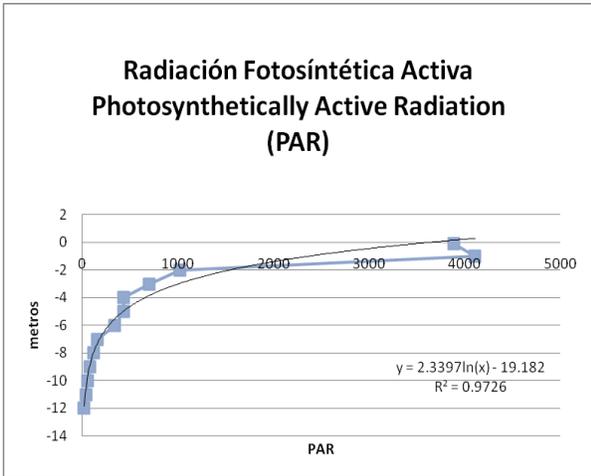


Figura 45 a. Sitio W14, junio 2014

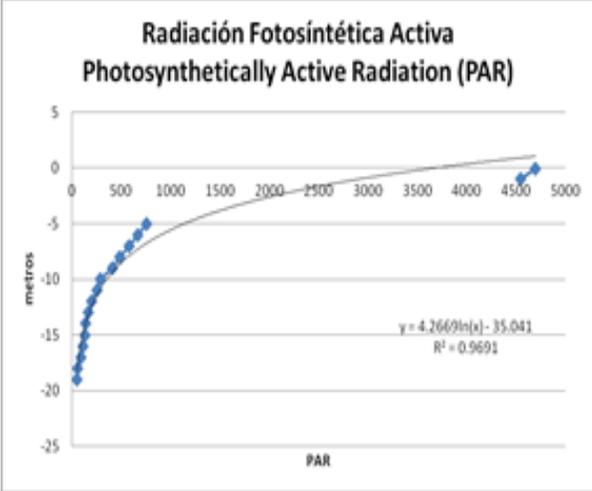


Figura 45 b. Sitio WA, junio 2014

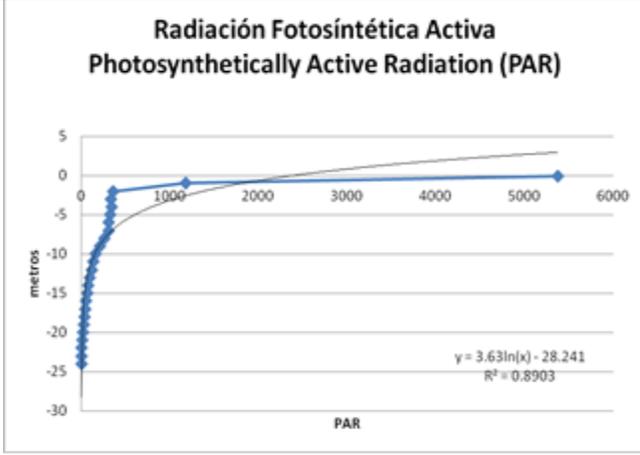


Figura 45 c. Sitio WB, junio 2014

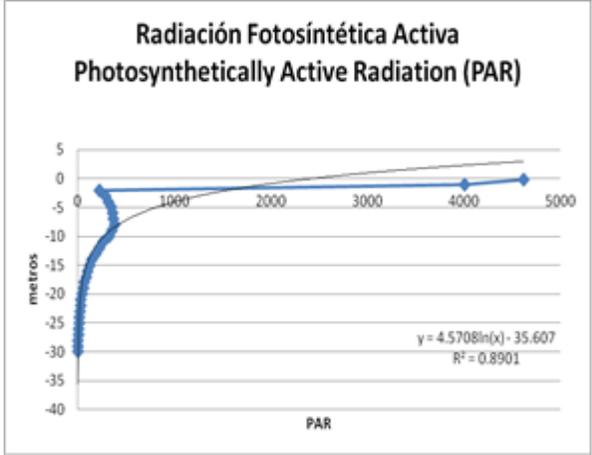


Figura 45 d. Sitio WC, junio 2014

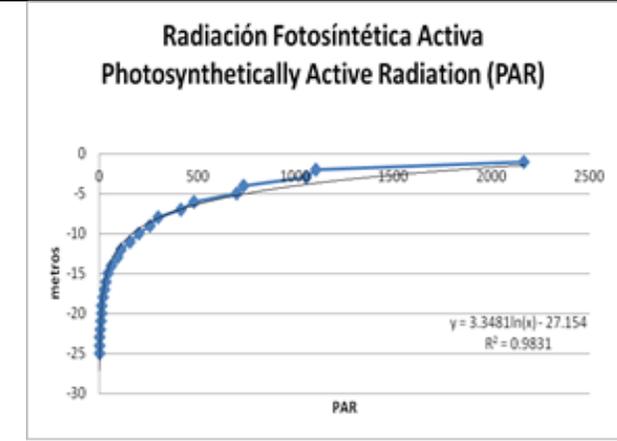


Figura 45 e. Sitio WD, junio 2014

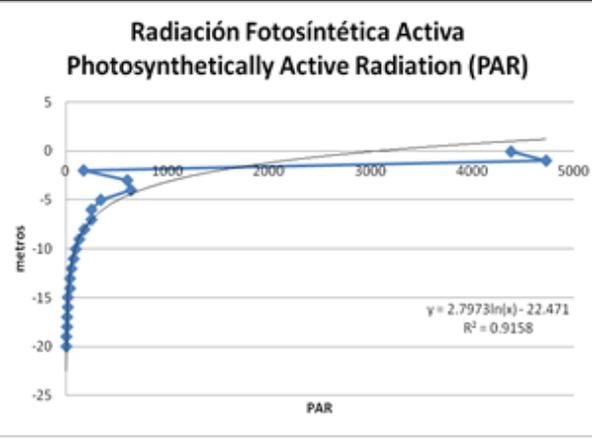


Figura 45 f. Sitio WE, junio 2014

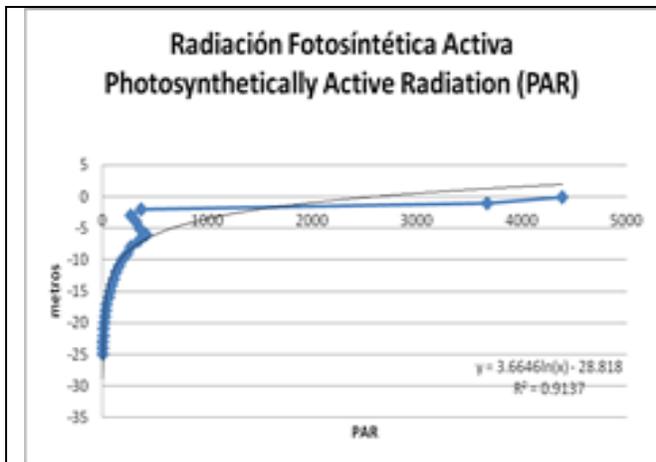


Figura 45 g. Sitio WG, junio 2014

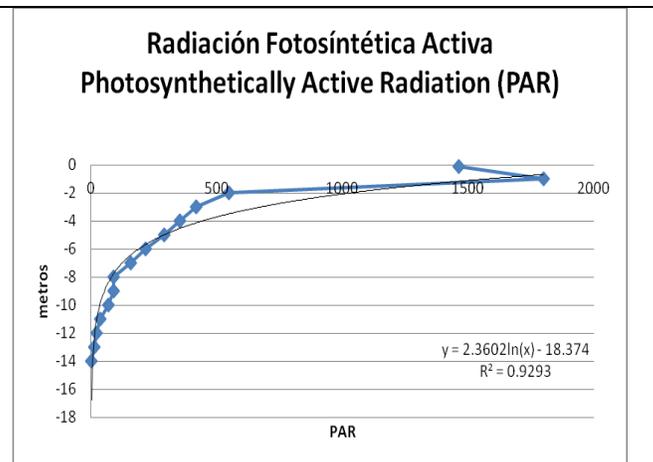


Figura 45 h. Sitio WP, junio 2014

Figura 45. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época lluviosa, junio 2014

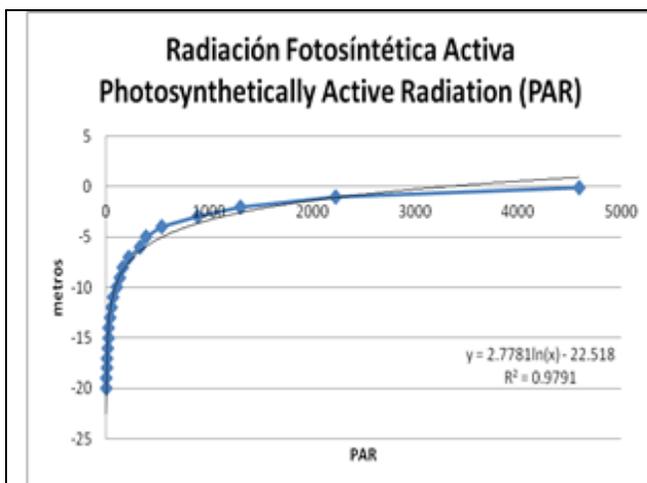


Figura 46 a. Sitio W14, julio 2014

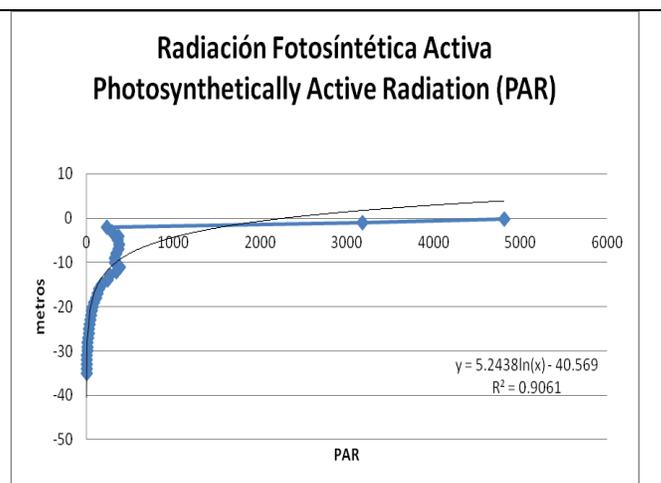


Figura 46 b. Sitio WA, julio 2014

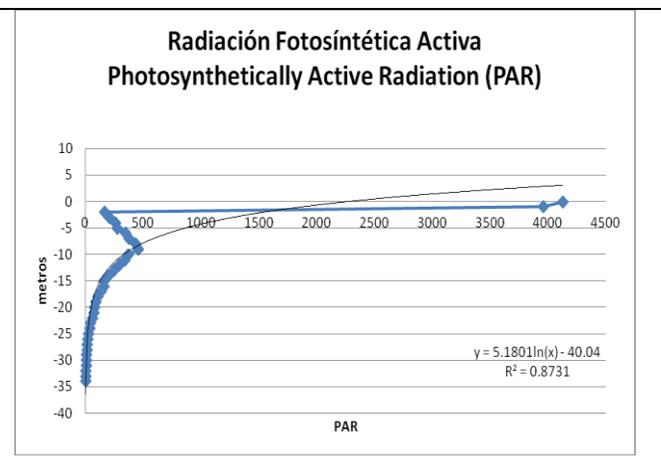
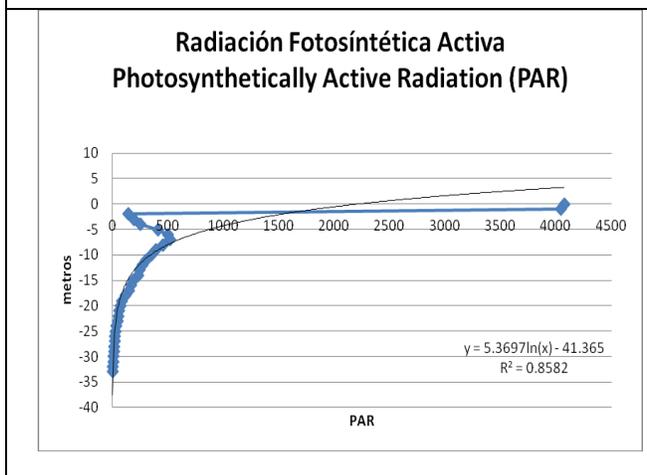


Figura 46 c. Sitio WB, julio 2014

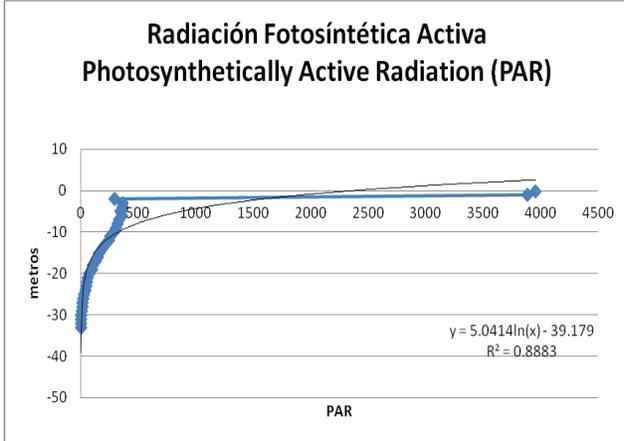


Figura 46 d. Sitio WC, julio 2014

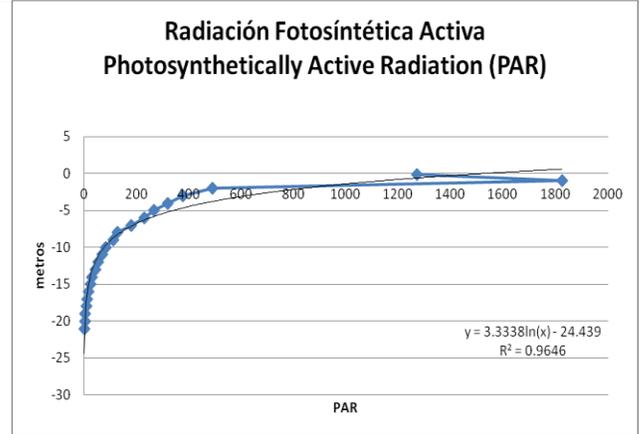


Figura 46 e. Sitio WD, julio 2014

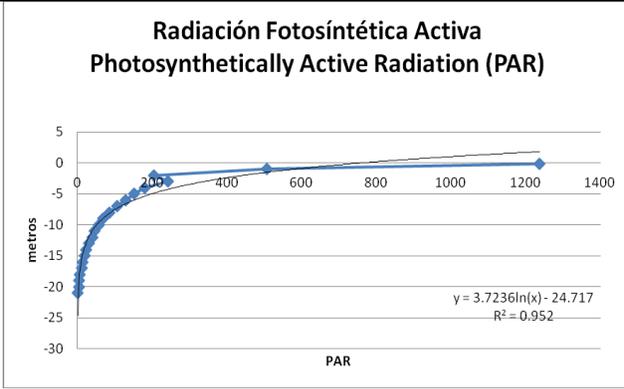


Figura 46 f. Sitio WE, julio 2014

Figura 46 g. Sitio WG, julio 2014

Figura 46. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época lluviosa, julio 2014

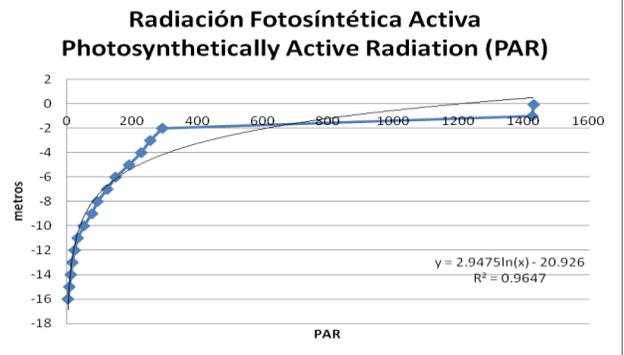


Figura 47 a. Sitio W14, agosto 2014

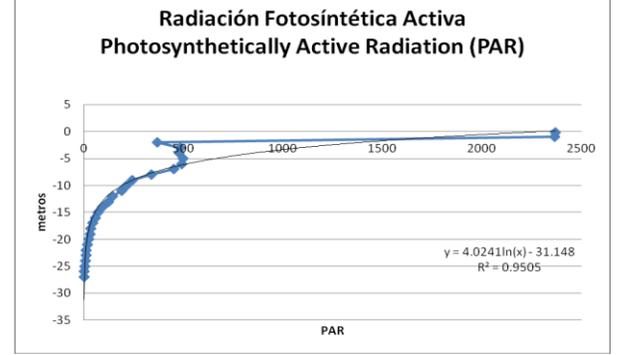


Figura 47 b. Sitio WA, agosto 2014

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

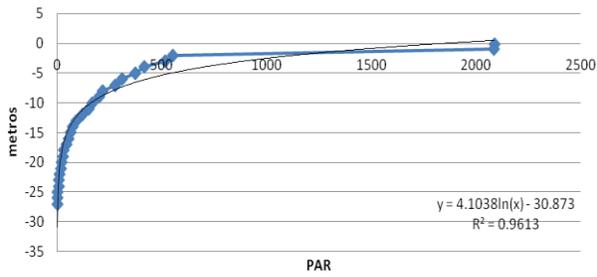


Figura 47 c. Sitio WB, agosto 2014

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

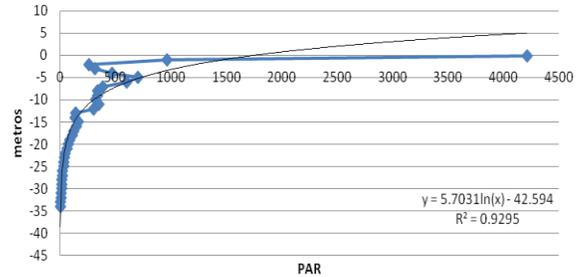


Figura 47 d. Sitio WC, agosto 2014

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

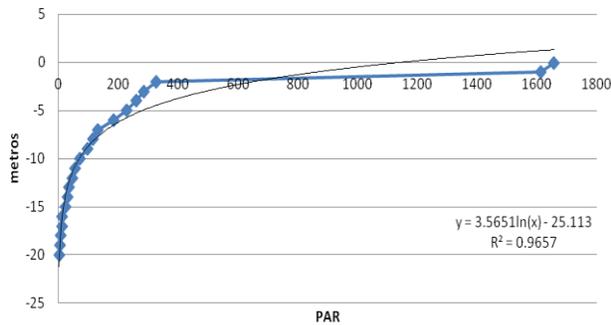


Figura 47 e. Sitio WE, agosto 2014

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

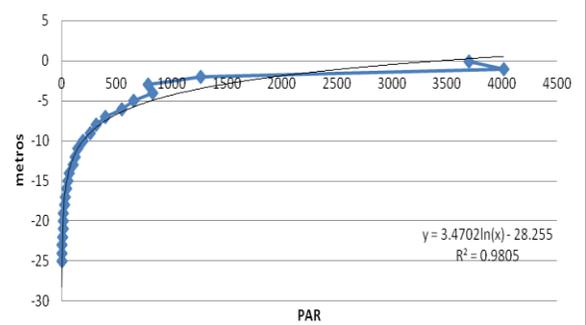


Figura 47 f. Sitio WG, agosto 2014

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

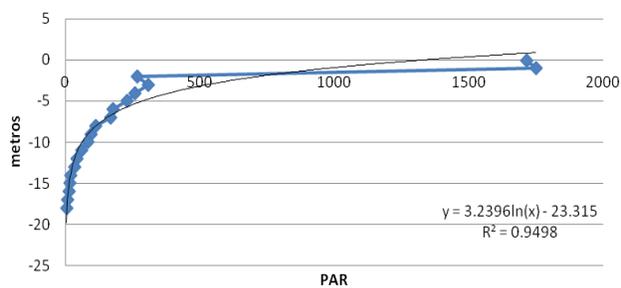


Figura 47 g. Sitio WP, agosto 2014

Figura 47. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época lluviosa, agosto 2014

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

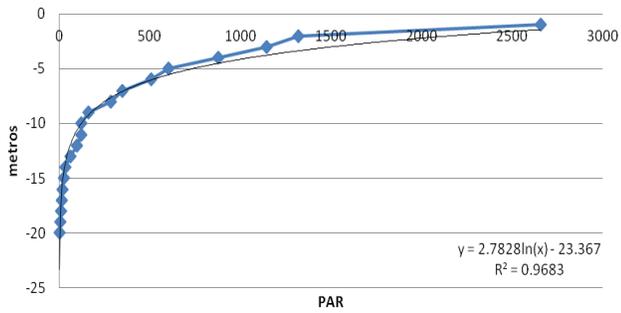


Figura 48 a. Sitio W14, septiembre 2014

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

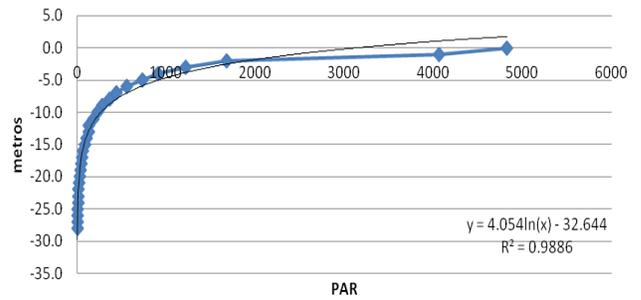


Figura 48 b. Sitio WA, septiembre 2014

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

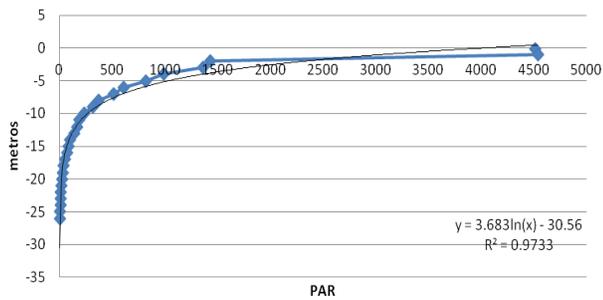


Figura 48 c. Sitio WB, septiembre 2014

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

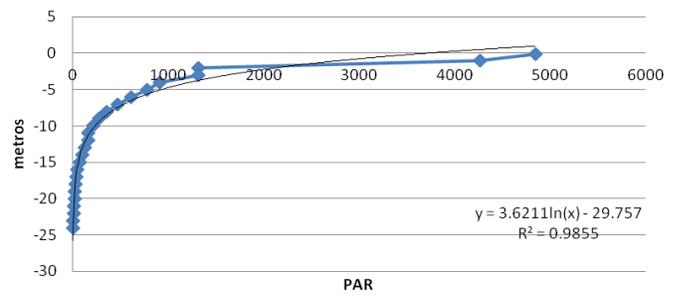


Figura 48 d. Sitio WC, septiembre 2014

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

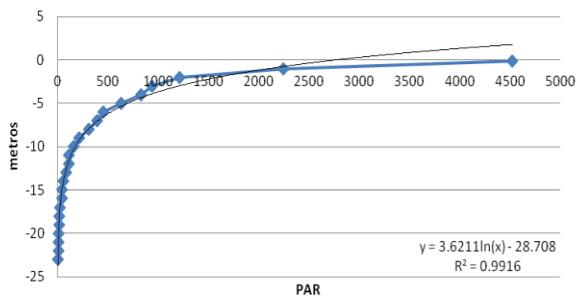


Figura 48 e. Sitio WD, septiembre 2014

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

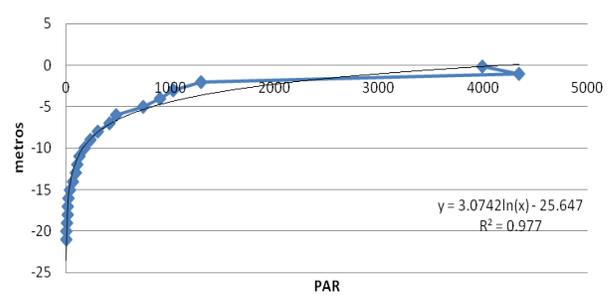


Figura 48 f. Sitio WE, septiembre 2014

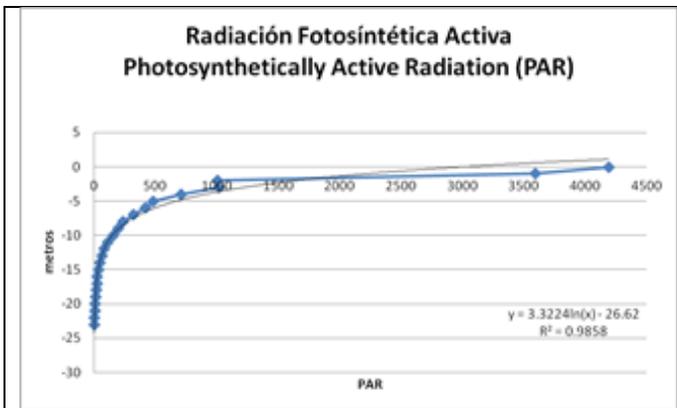


Figura 48 g. Sitio WG, septiembre 2014

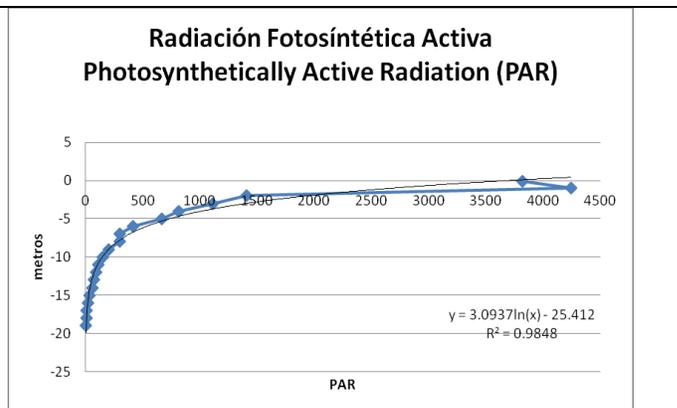


Figura 48 h. Sitio WP, septiembre 2014

Figura 48. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época lluviosa, septiembre 2014

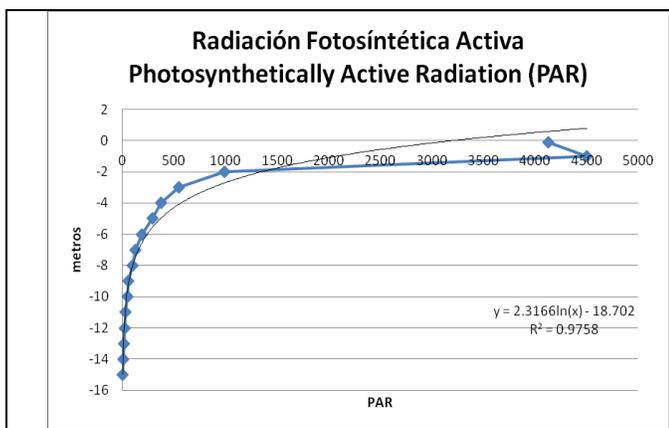


Figura 49 a. Sitio W14, octubre 2014

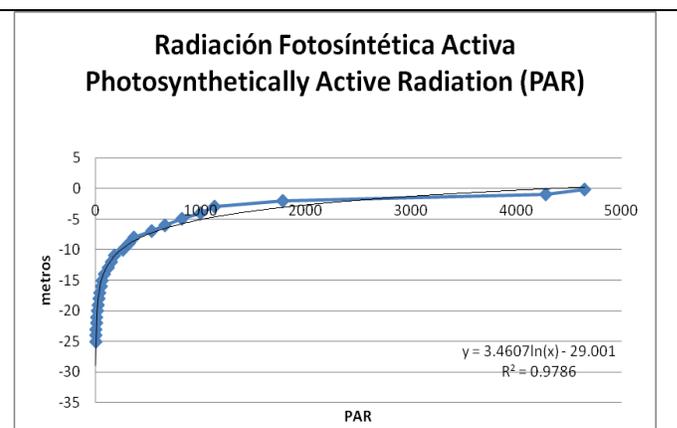


Figura 49 b. sitio WA, octubre 2014

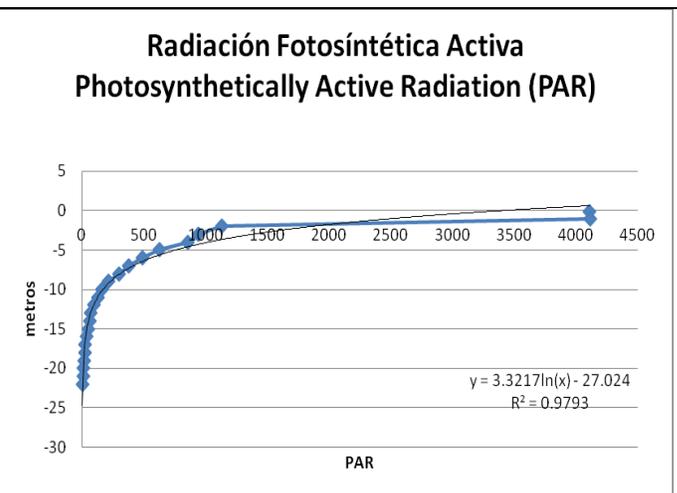
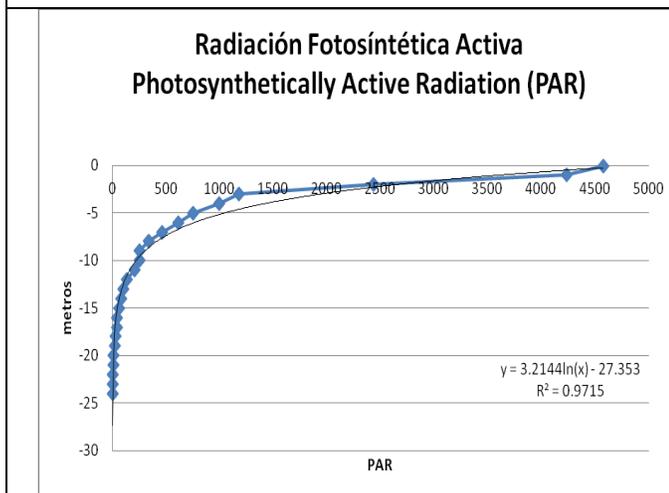


Figura 49 c. Sitio WB, octubre 2014

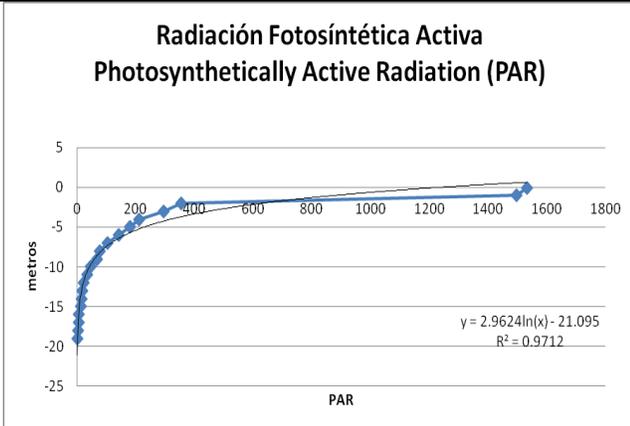


Figura 49 d. Sitio WC, octubre 2014

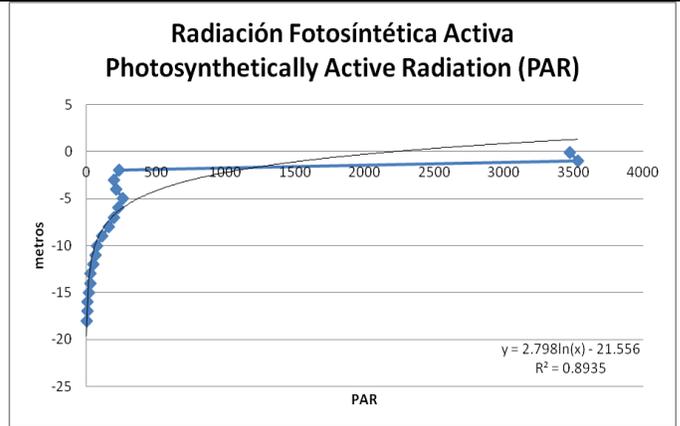


Figura 49 e. Sitio WD, octubre 2014

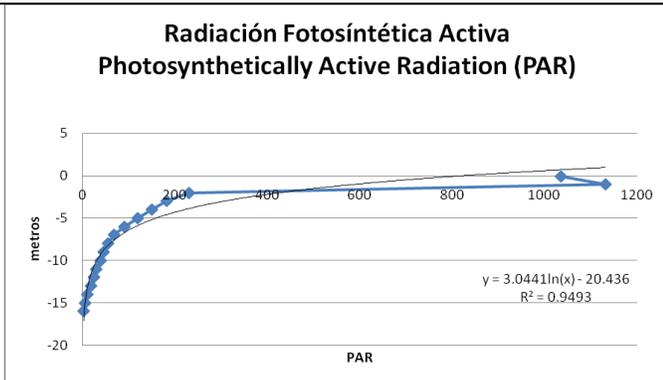


Figura 49 f. Sitio WE, octubre 2014

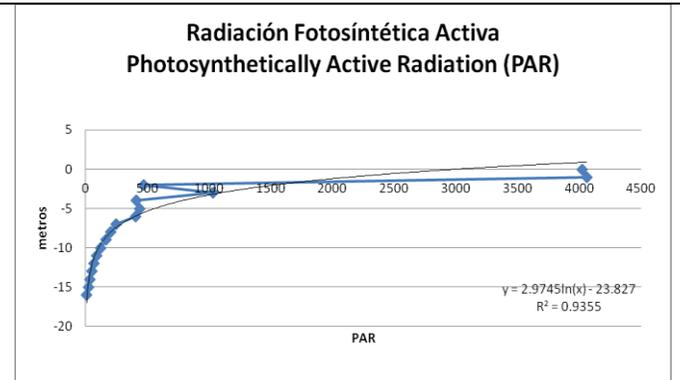


Figura 49 g. Sitio WG, octubre 2014

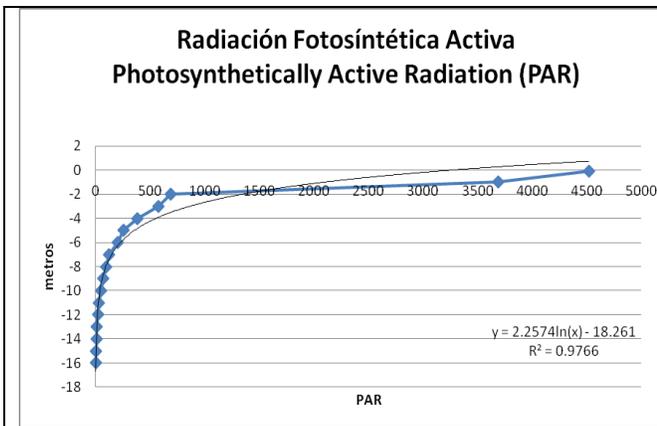


Figura 49 h. Sitio WP, octubre 2014

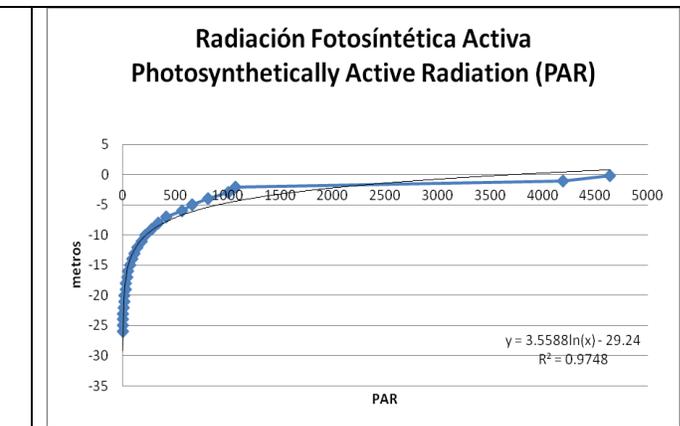


Figura 49. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época lluviosa, octubre 2014

Figura 50 a. Sitio W14, noviembre 2014

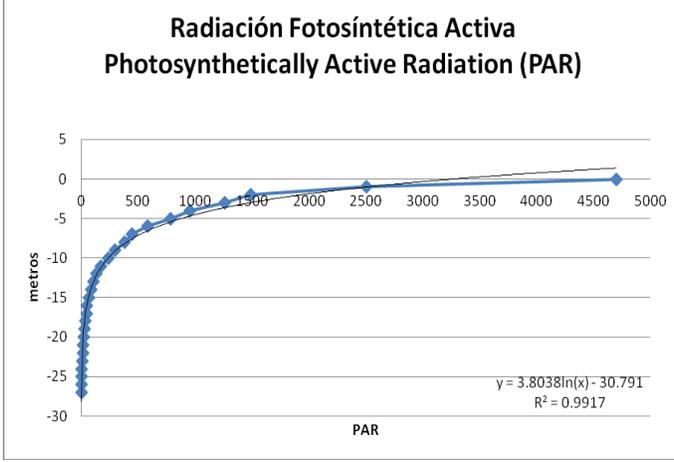


Figura 50 b. Sitio WA, noviembre 2014

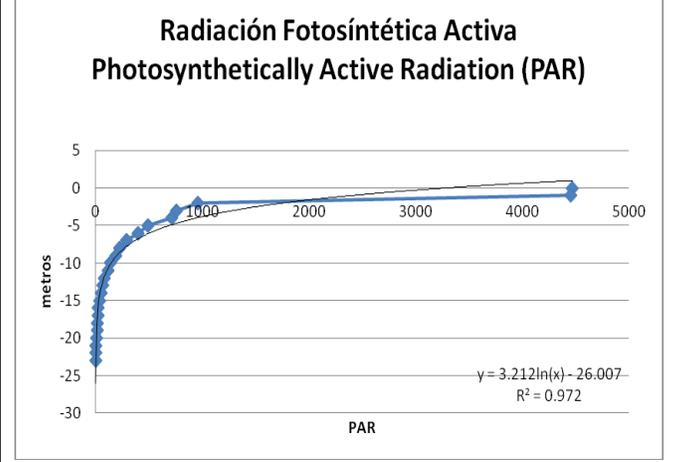


Figura 50 c. Sitio WB, noviembre 2014

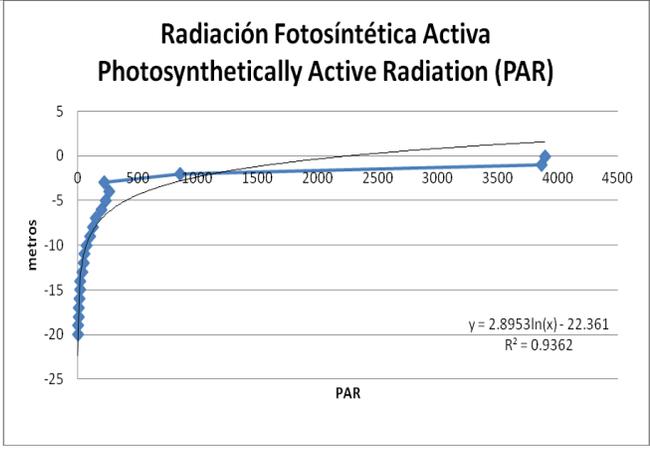


Figura 50 d. Sitio WC, noviembre 2014

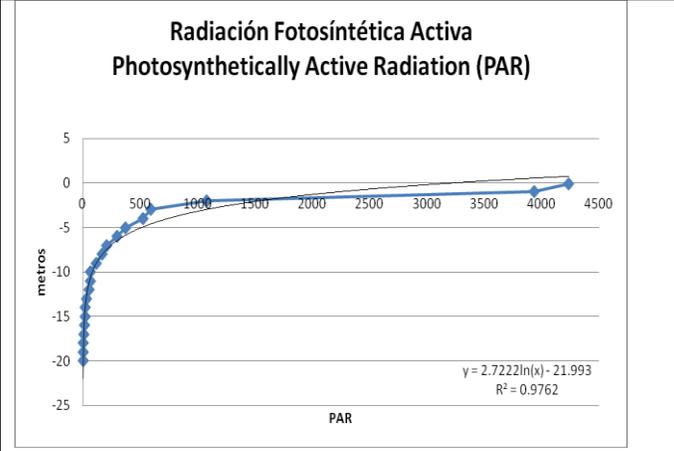


Figura 50 e. Sitio WD, noviembre 2014

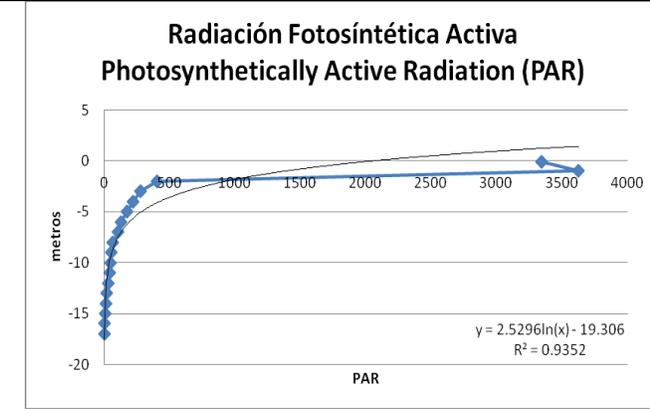


Figura 50 f. Sitio WE, noviembre 2014

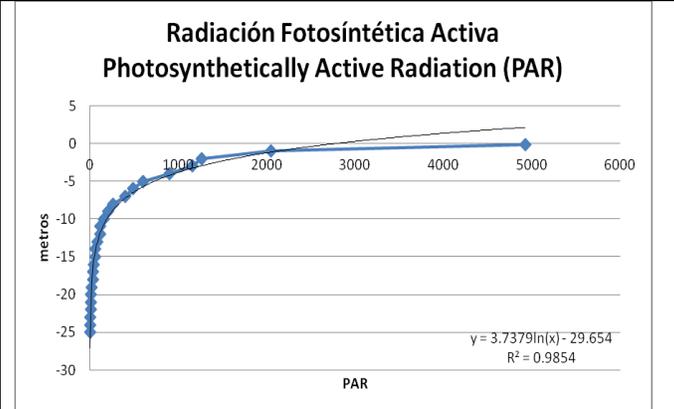
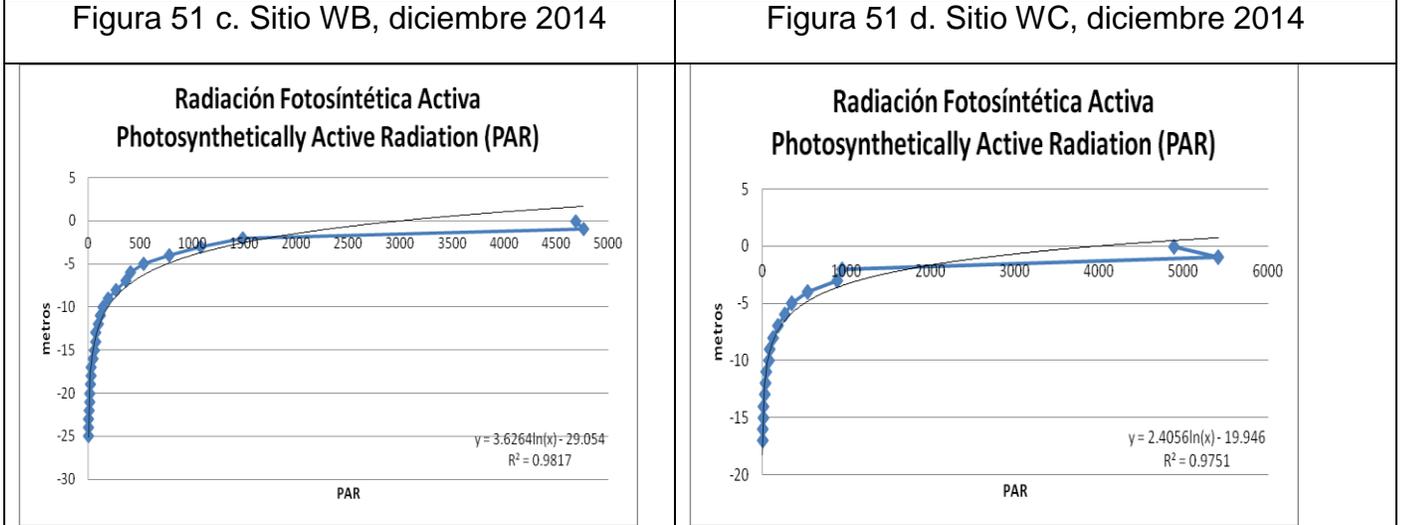
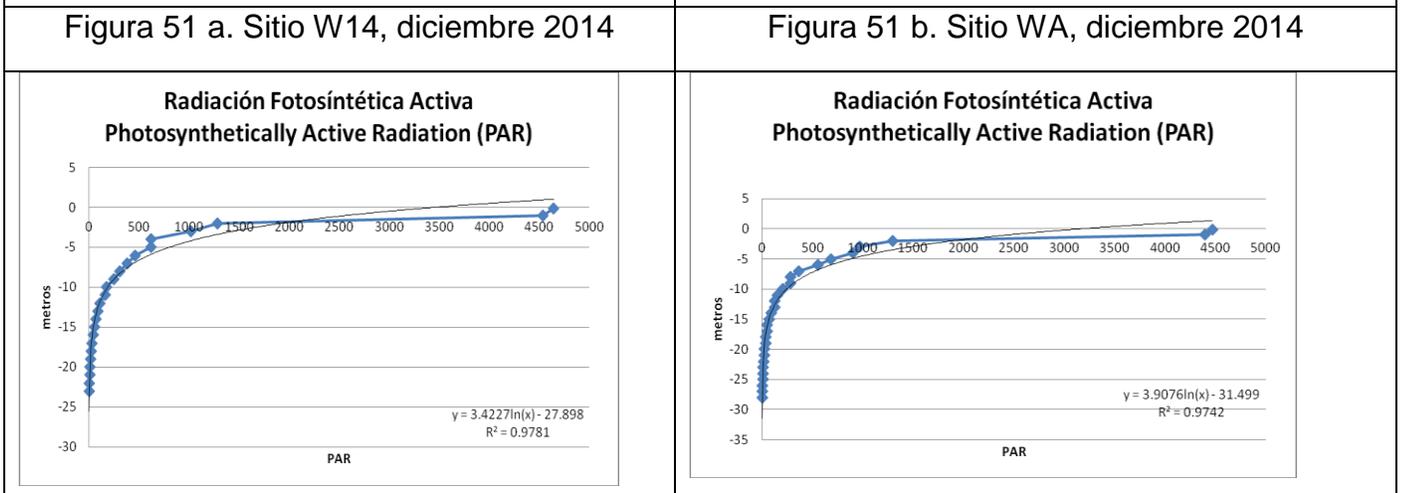
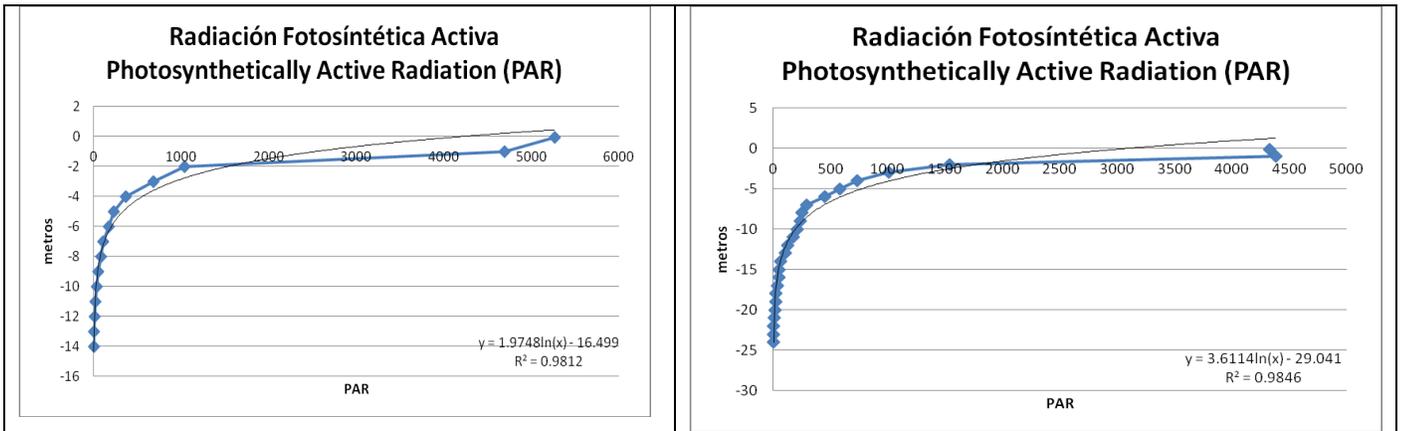


Figura 50 g. Sitio WG, noviembre 2014

Figura 50 h. Sitio WP, noviembre 2014

Figura 50. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época seca, noviembre 2014



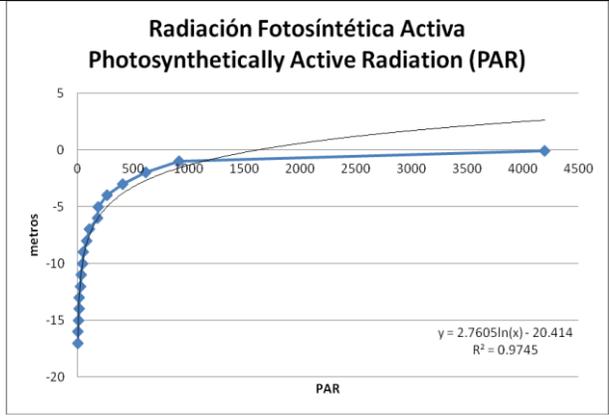


Figura 51 g. Sitio WG, diciembre 2014

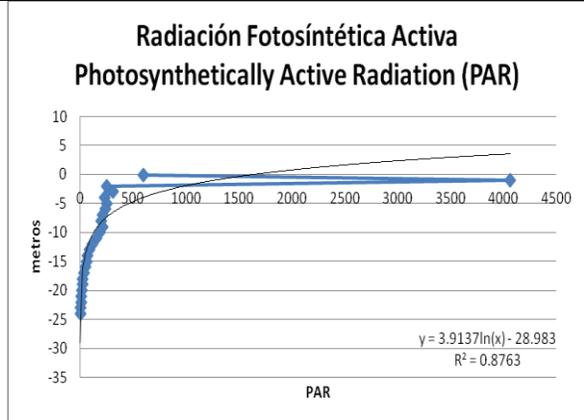


Figura 51 h. Sitio WP, diciembre 2014

Figura 51. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época seca, diciembre 2014

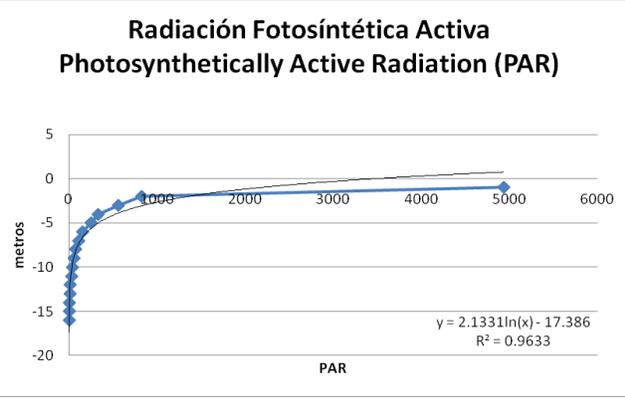


Figura 52 a. Sitio W14, enero 2015

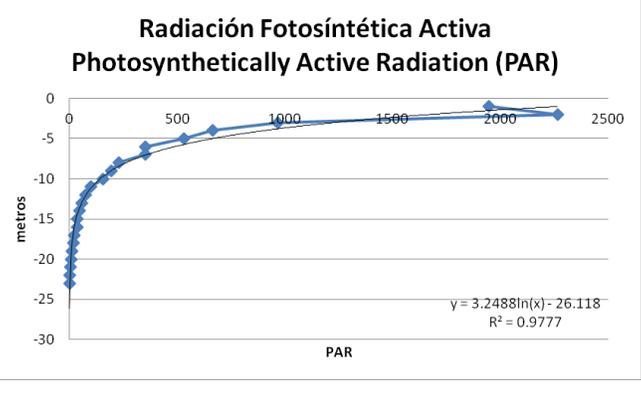


Figura 52 b. Sitio WA, enero 2015

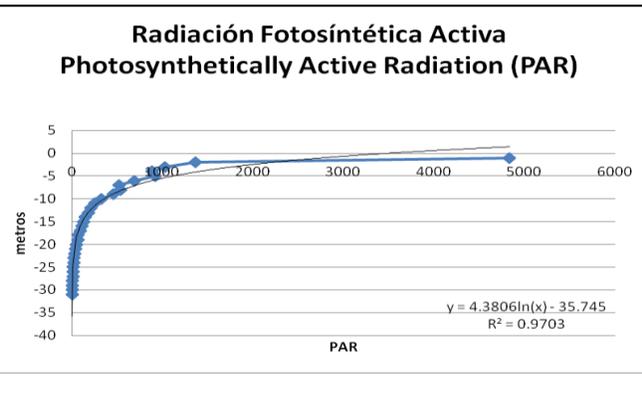


Figura 52 c. Sitio WB, enero 2015

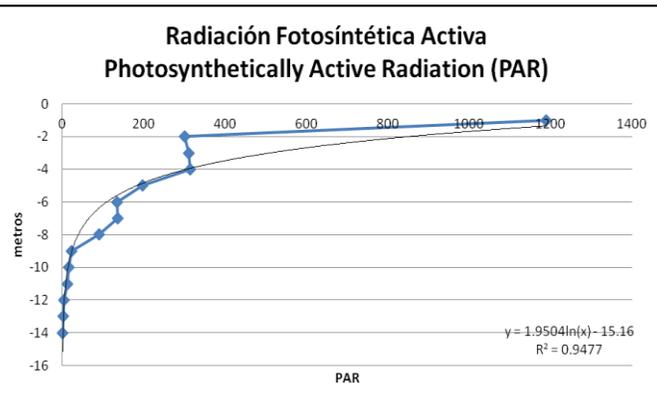


Figura 52 d. Sitio WC, enero 2015

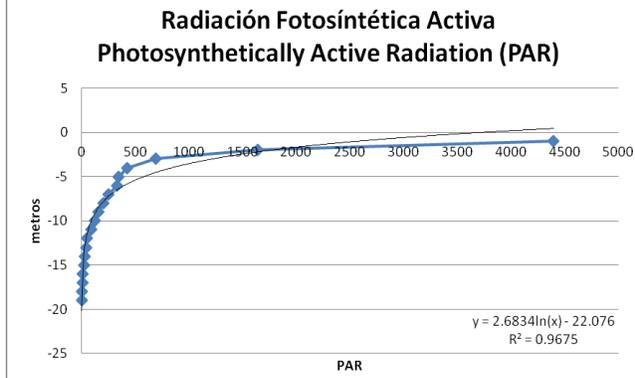


Figura 52 e. Sitio WD, enero 2015

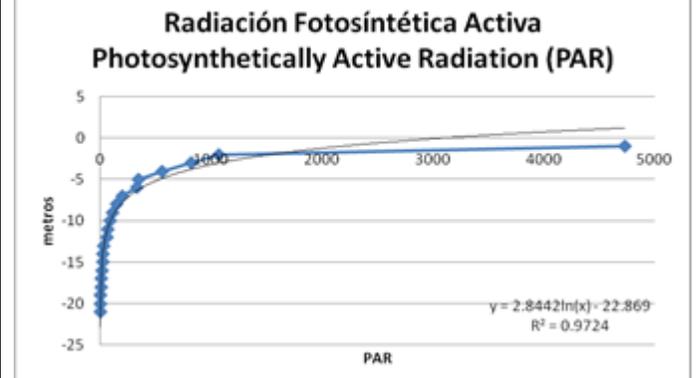


Figura 52 f. Sitio WE, enero 2015

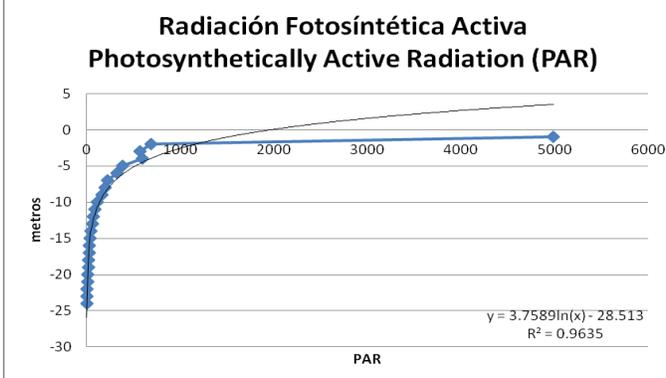


Figura 52 g. Sitio WG, enero 2015

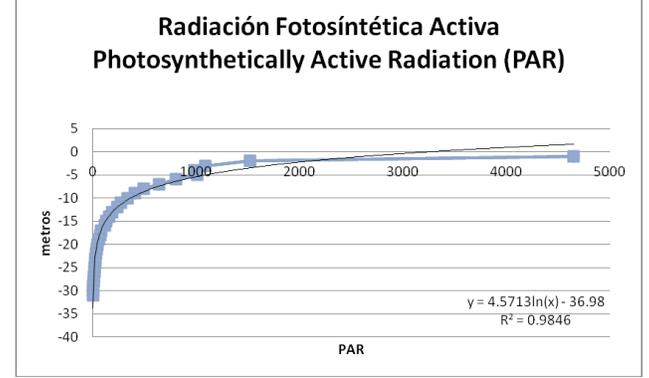


Figura 52 h. Sitio WP, enero 2015

Figura 52. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época seca, enero 2015

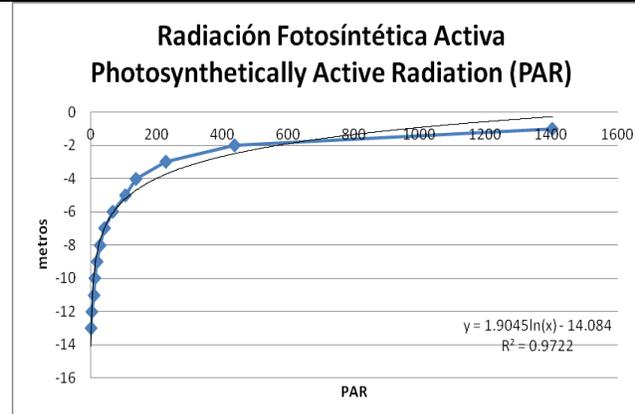


Figura 53 a. Sitio W14, febrero 2015

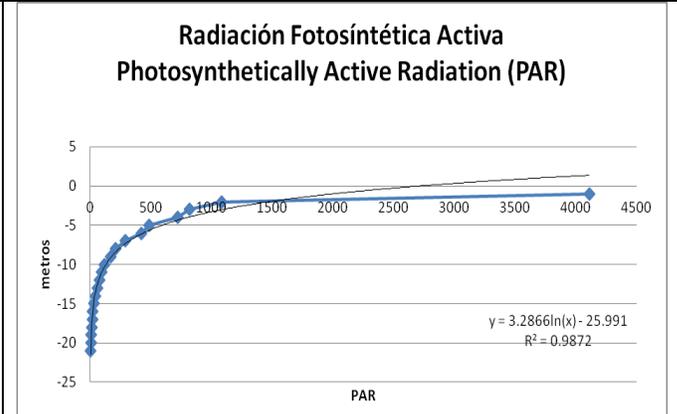


Figura 53 b. Sitio WA, febrero 2015

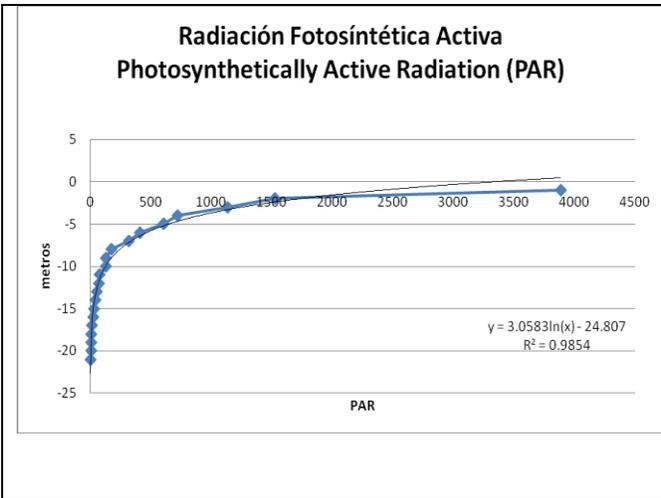


Figura 53 c. Sitio WB, febrero 2015

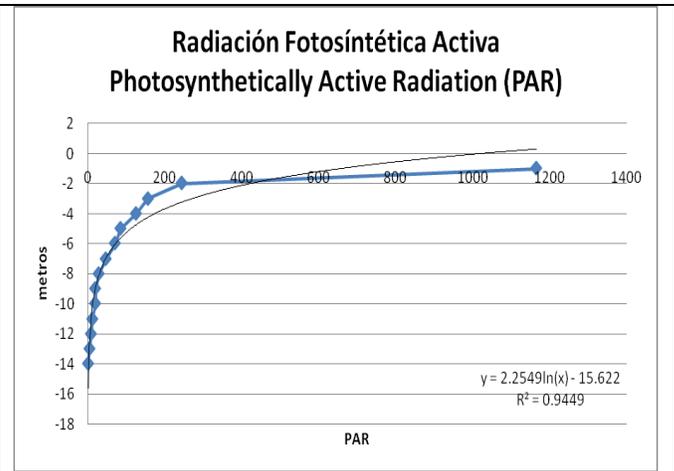


Figura 53 d. Sitio WC, febrero 2015

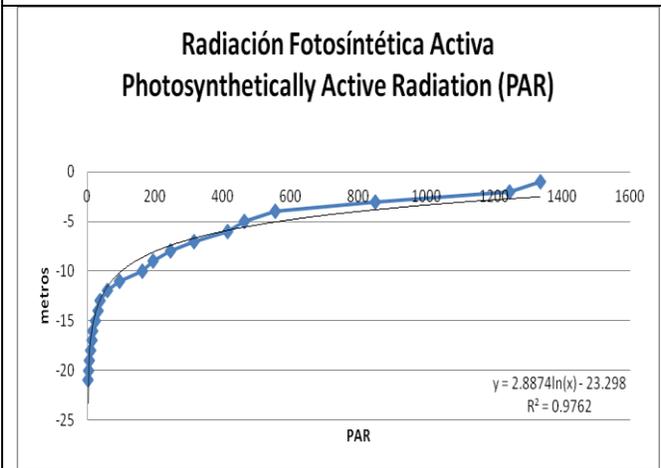


Figura 53 e. Sitio WD, febrero 2015

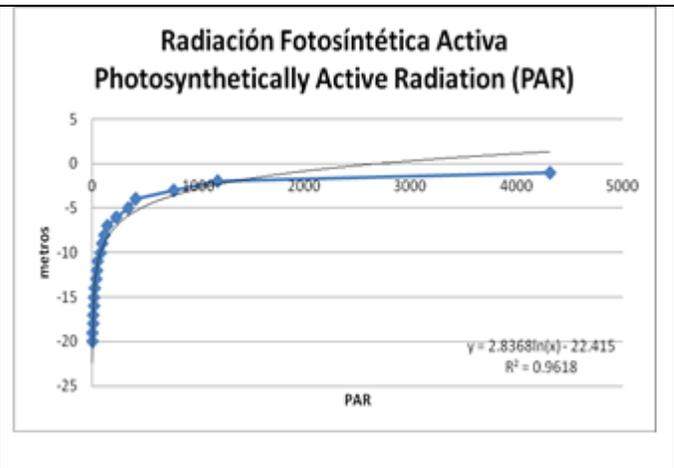


Figura 53 f. Sitio WE, febrero 2015

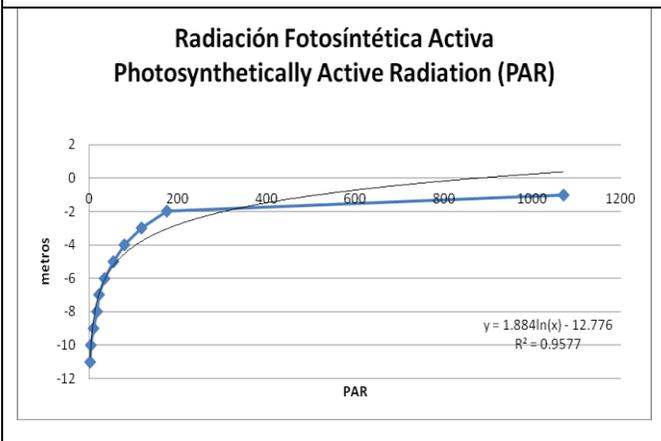


Figura 53 g. Sitio WG, febrero 2015

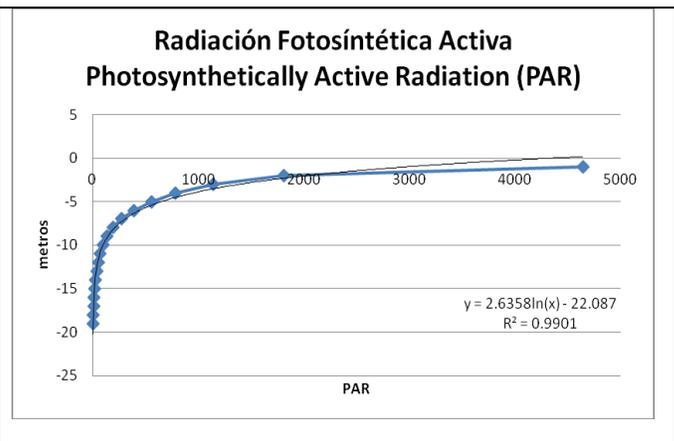


Figura 53 h. Sitio WP, febrero 2015

Figura 53. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época seca, febrero 2015

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

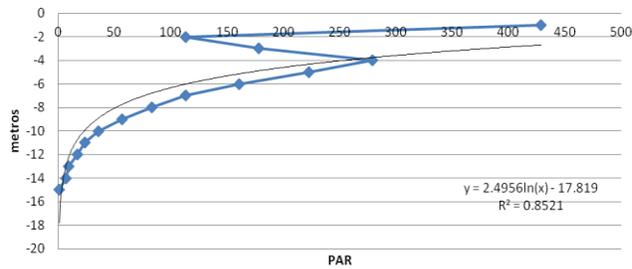


Figura 54 a. Sitio W14, marzo 2015

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

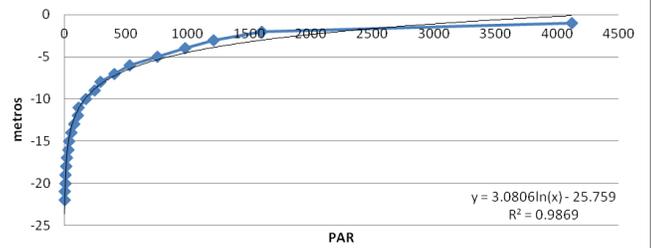


Figura 54 a. Sitio WA, marzo 2015

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

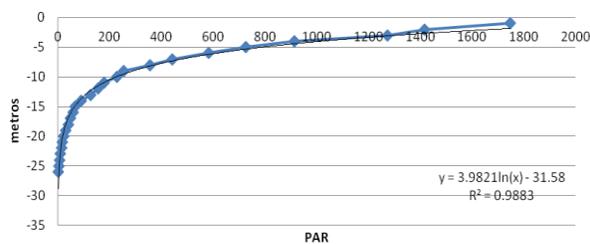


Figura 54 c. Sitio WB, marzo 2015

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

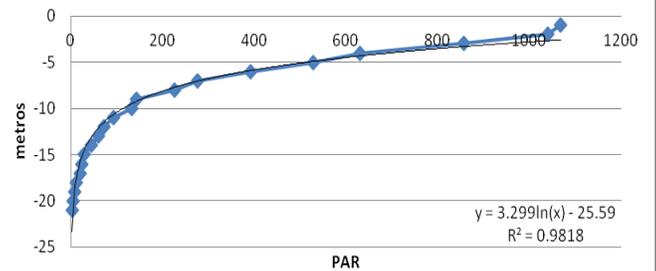


Figura 54 d. Sitio WC, marzo 2015

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

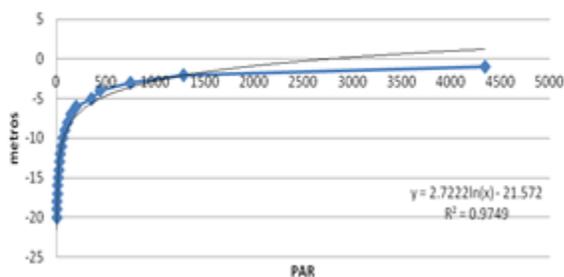


Figura 54 e. Sitio WD, marzo 2015

**Radiación Fotosintética Activa
Photosynthetically Active Radiation (PAR)**

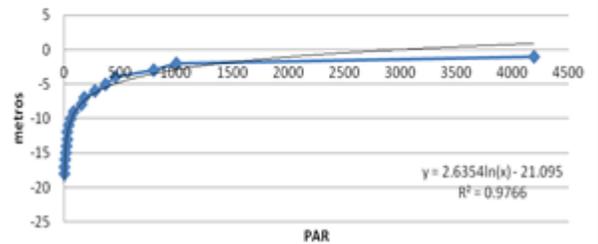


Figura 54 f. Sitio WE, marzo 2015

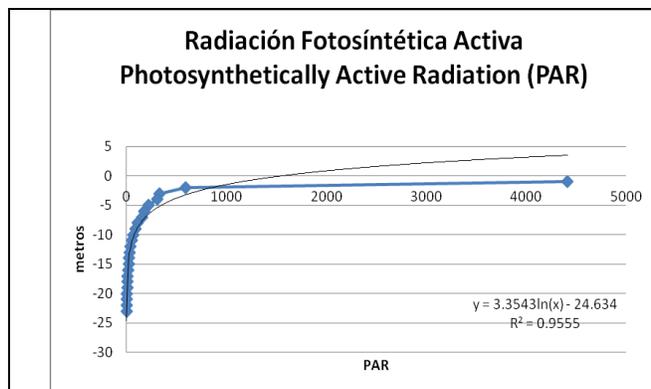


Figura 54 g. Sitio WG, marzo 2015

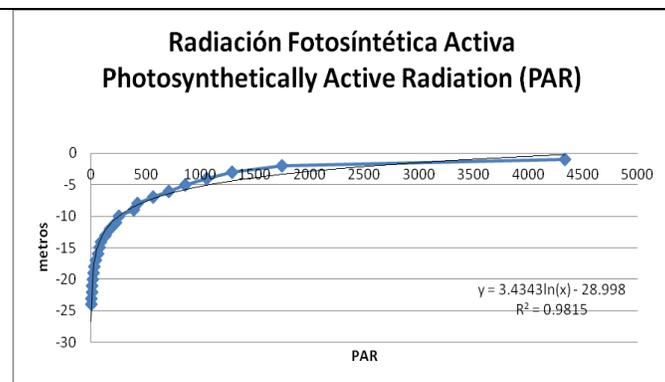


Figura 54 h. Sitio WP, marzo 2015

Figura 54. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época seca, marzo 2015

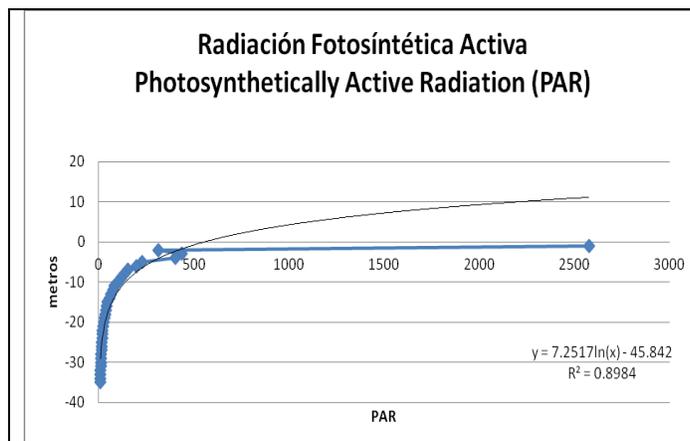


Figura 55 a. Sitio WC, abril 2015

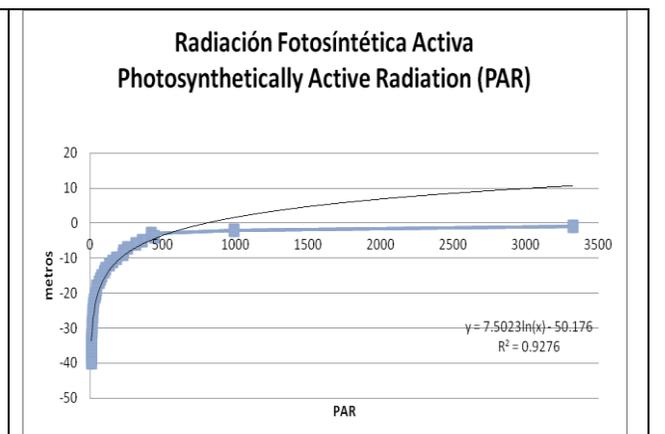


Figura 55 b. Sitio WD, abril 2015

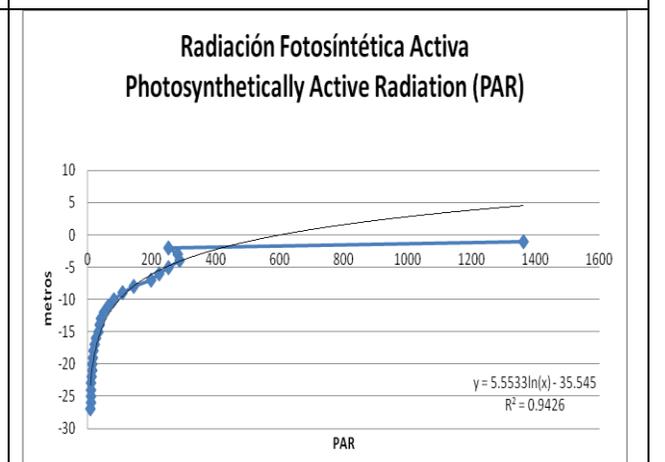
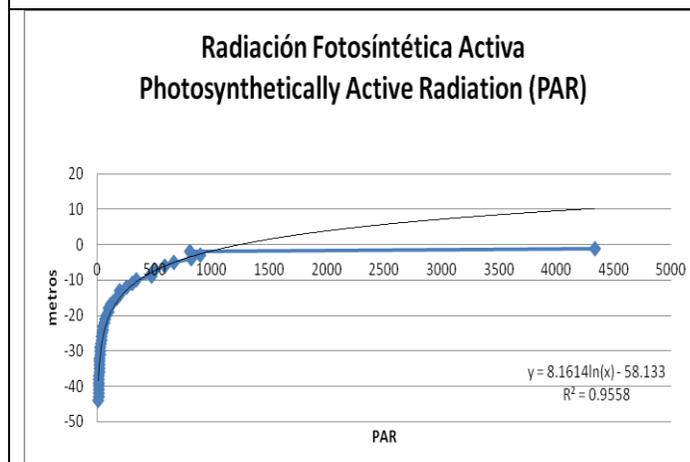


Figura 55 c. Sitio WG, abril 2015

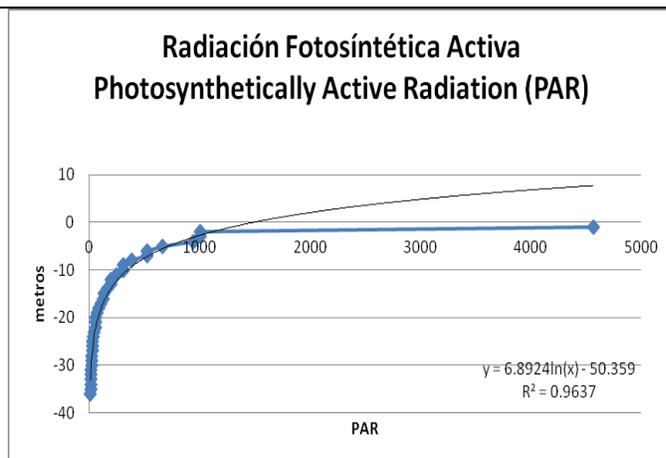


Figura 55 d. Sitio W14, abril 2015

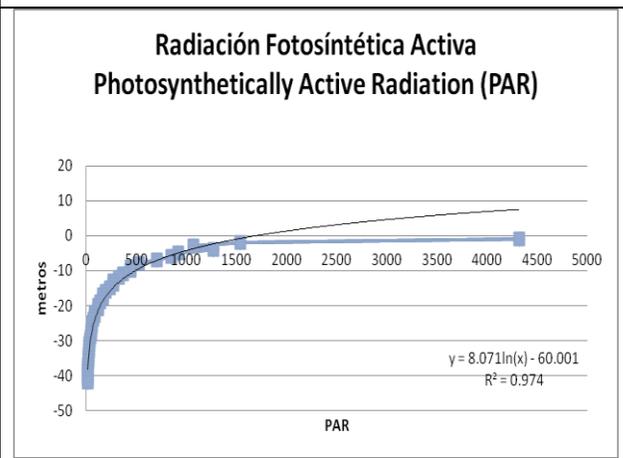


Figura 55 e. Sitio WE, abril 2015

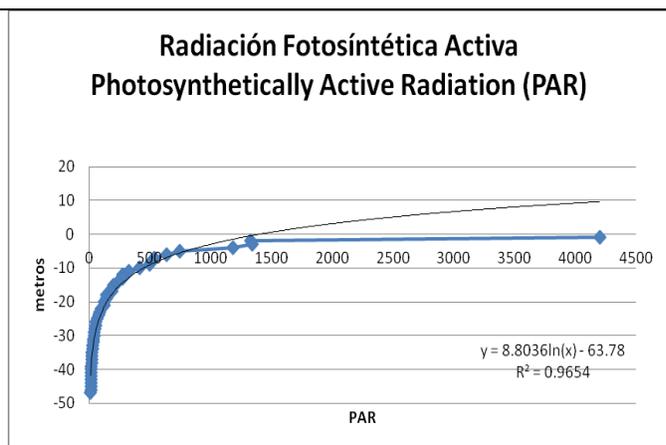


Figura 55 f. Sitio WA, abril 2015

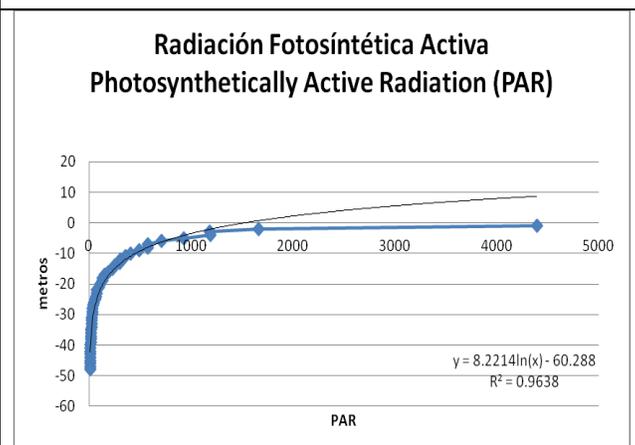


Figura 55 g. Sitio WB, abril 2015



Figura 55 h. Sitio WP, abril 2015

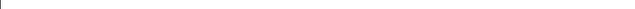


Figura 55. Comportamiento de PAR y profundidad (m) durante la época seca, abril 2015