

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**CONSTRUCCIÓN DE MEDIDORES DE IRRADIANCIA DE
BAJO COSTO Y ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE
RADIACIÓN DE EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

ACOSTA TORRES, JOB NEHEMÍAS

LÓPEZ CRUZ, JULIO CESAR

MOREIRA GÓMEZ, DEIBY JOSUÉ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO 2021

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO/A GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR:

ING. ARMANDO MARTINEZ CALDERON

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OPCIÓN DEL
GRADO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

TÍTULO:

**CONSTRUCCIÓN DE MEDIDORES DE IRRADIANCIA DE
BAJO COSTO Y ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE
RADIACIÓN DE EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

ACOSTA TORRES, JOB NEHEMÍAS

LÓPEZ CRUZ, JULIO CESAR

MOREIRA GÓMEZ, DEIBY JOSUÉ

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

DOCENTE ASESOR:

MSC. JORGE ALBERTO, ZETINO CHICAS

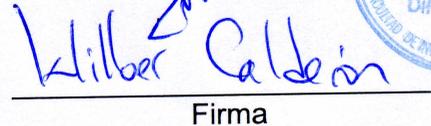
NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, viernes 5 de febrero de 2021, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 6:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón
Director


Firma

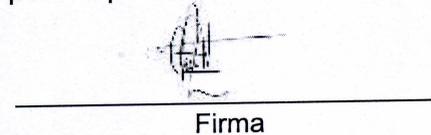
2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma

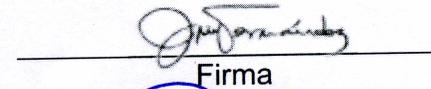


Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

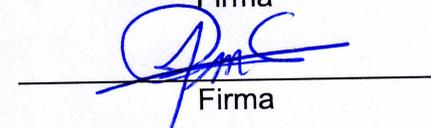
- MSC. JORGE ALBERTO ZETINO CHICAS
(Docente Asesor)


Firma

- ING. JOSE MIGUEL HERNANDEZ


Firma

- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMENEZ


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

CONSTRUCCIÓN DE MEDIDOR DE IRRADIANCIA DE BAJO COSTO Y ACTUALIZACIÓN
DE MAPA DE RADIACIÓN DE EL SALVADOR

A cargo de los Bachilleres:

- ACOSTA TORRES JOB NEHEMIÁS

- LÓPEZ CRUZ JULIO CÉSAR

- MOREIRA GÓMEZ DEIBY JOSUÉ

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 9.1

(Nueve punto uno)

AGRADECIMIENTOS

Dios, por tu infinita misericordia me has permitido sonreír ante todos mis logros que son el resultado de tu ayuda e intervención divina, desde el inicio hasta el final has sido tu quien me ha ayudado y me ha permitido superar cada obstáculo que como resultado me han hecho una mejor persona.

Marideysis Gómez de Moreira y José Moreira quienes siempre han sido y serán ese motor que me impulsa a rendir unos kilómetros más aun cuando mis fuerzas dicen ya no, palabras de aliento en los momentos difíciles, compañía en la soledad, la razón de mi existir.

Francisco M. por tu apoyo incondicional en el momento menos esperado extendiste tu brazo para ayudarme a levantar las pesas que ya no podía y no me abandonaste, ahora luego de vencer reconozco que el oro de la copa te pertenece a ti también.

Si mencionara el agradecimiento que siento hacia todos los compañeros que han estado a mi lado apoyándome sería una enorme lista y aun cuando no los mencione con nombre y apellido cada grano que ustedes me aportaron es agradecido en mi corazón, existe un cariño especial para aquellos con los que más tiempo compartí, entre horas de clase y estudio, desayunos y almuerzos, desvelos, chistes y frustraciones. Julio López más que compañero un amigo con quien siempre discutí pero así aprendimos, luego de cada fracaso y éxito que tuvimos, además de ese apoyo incondicional que has demostrado siempre gracias, Jocelyn Navas compañera y amiga a quien le falle al romper la promesa de que estaríamos juntos hasta que electrónica nos separará, porque electrónica es un reto superado pero nuestra amistad no se ha terminado, por todo lo que de ti aprendí gracias, Kevin Comayagua gracias por cada hora de estudio compartido he aprendido de tu seriedad y dedicación, agradezco también a Job A, Jesús D., Romeo J., Cristian G., Santos M., Wilfredo C., y Alexander Z.

Agradecimiento muy especial a mis hermanos, familiares y amigos que siempre me han apoyado y animado en cada proceso que este reconfortante logro ha conllevado.

Deiby Moreira.

Agradezco a Dios por guiarme durante todo el camino, que desde antes del inicio me permitió ver su bondad en mí, y una vez iniciada la carrera por el alma mater jamás deje de ver los milagros que hacía en mi vida, y agradezco mayormente por cada una de las personas con las que me permitió compartir a lo largo de la carrera, personas que se convirtieron en amigos y ahora son parte de este éxito.

A mis padres José Adolfo Lopez y Claudia Carolina de Lopez, que me brindaron no solo su ayuda, sino también su apoyo incondicional que si no fuera por ellos este camino hubiese sido más difícil, gracias por su forma tan peculiar de hablarme y aconsejarme como amigos, en el cumplimiento de esta meta el éxito también es suyo.

A Reina Vides, que se convirtió en una amiga y fue como una madre para mi dentro y fuera de la universidad, le agradezco enormemente por estar ahí siempre pendiente de mí, más allá de formar parte de este éxito le agradezco por brindarme su sincera amistad.

A cada uno de mis compañeros con los que compartí y el tiempo los volvió amigos, este éxito también es de usted. Agradecimiento especial a Kevin Comayagua su amistad resulto ser un apoyo en muchas ocasiones, y lo sigue siendo, a Deiby Moreira mi compañero y amigo, que a pesar de los debates y diferentes maneras de pensar te convertiste en piedra angular en esta investigación y sin duda alguna tu amistad fue clave para culminar esta carrera. Marco Díaz que a pesar de lo poco que convivimos en la carrera me brindaste apoyo y sincera amistad. Jesús Diaz, Fredy Bonilla, Jocelyn Navas, Juan Erazo, Karen Agreda, y a todos los que no pueda mencionar gracias.

A mi mejor amiga Marielos que durante el trascurso de mi carrera me acompañaste, y en los momentos más importantes para cumplir esta meta, me brindaste tu apoyo a pesar del enorme esfuerzo que te tocaba hacer nunca dudaste en sostenerme y animarme a seguir, gracias porque empezaste como amiga y al culminar esta meta te convertiste en mi todo.

Julio López.

Le agradezco a Dios por brindarme la guía, el apoyo y acompañarme en los tiempos difíciles.

A mi padre que con mucho esfuerzo me brindo su ayuda incondicional, que proyecto sus sueños en mí, me motivo cada día a ser mejor persona y me enseñó que a pesar de las adversidades, siempre se puede sonreír y seguir adelante, fuiste y serás siempre el pilar más valioso en mi vida, este logro es para ti, hasta donde te encuentres en el infinito.

A mis hermanas por ser parte fundamental en mi vida, a mis tíos y tías, primos que siempre me apoyaron y me brindaron sus consejos.

Al Ing. Jorge Zetino por el apoyo en nuestro proceso de tesis, por todos los conocimientos transmitidos que nos hacen además de ser buenos profesionales, mejores personas. A los catedráticos de la escuela por brindarnos su apoyo en nuestro proceso de aprendizaje.

A Reina Vides por todos los consejos, por siempre brindarme su apoyo incondicional hasta en los peores momentos, por enseñarme tantas lecciones valiosas en mi vida, por siempre alentarme a ser un mejor profesional y mejor persona.

A mis compañeros y amigos de IEEE y ASEIE por su apoyo, por la vocación de servicio que nos formamos como colectivo para siempre estar dispuestos a aportar nuestros conocimientos para mejorar nuestro entorno, para que nunca perdamos esos ideales de servicio y los sueños de ver a nuestra universidad y a nuestro país cada día mejor.

A Julio y Deiby por haber sido mis compañeros de tesis y amigos, por haberme tenido la paciencia necesaria y por motivarme a seguir adelante en los momentos difíciles, a pesar de todos los obstáculos que tuvimos que superar en la carrera nunca nos dimos por vencidos.

A todos y cada una de las personas que tienen un significado especial en mi vida, les dedico este pequeño triunfo.

Job Acosta.

ÍNDICE DE CONTENIDO.

1-	CAPÍTULO I: RECURSO SOLAR.	17
1.1-	LA TIERRA Y SUS MOVIMIENTOS RESPECTO AL SOL.	18
1.2-	EL SOL COMO FUENTE DE ENERGÍA.	19
1.2.1-	GEOMETRÍA SOLAR.	19
1.2.2-	EVALUACIÓN DEL RECURSO SOLAR	22
1.3-	APLICACIONES APROVECHANDO EL RECURSO SOLAR.	23
1.3.1-	ENERGÍA SOLAR PASIVA.	23
1.3.2-	ENERGÍA SOLAR ACTIVA.	24
1.4-	SECTOR ELÉCTRICO DEL PAÍS.	26
1.4.1-	GENERACIÓN.	26
1.4.2-	TRANSMISIÓN.	29
1.4.3-	DISTRIBUCIÓN.	29
1.4.4-	COMERCIALIZACIÓN.	29
1.5-	ENERGÍAS RENOVABLES EN EL SALVADOR Y SU IMPACTO.	30
2-	CAPÍTULO II: ESTACIONES DE MONITOREO DE IRRADIANCIA GLOBAL. 34	
2.1-	ANTECEDENTES DEL PROYECTO.	35
2.1.1-	DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES.	35
2.1.2-	CONSTRUCCIÓN DE LOS MEDIDORES.	40
2.1.3-	ALCANCES Y LIMITACIONES.	45
2.2-	DISEÑO DE MEDIDORES USANDO ARDUINO.	47
2.2.1-	DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES INCORPORADOS.	47
2.2.2-	MODIFICACIÓN DE LA ETAPA DE AMPLIFICACIÓN.	49
2.2.3-	RESULTADOS OBTENIDOS.	55
2.3-	DISEÑO DE MEDIDORES USANDO RASPBERRY.	64

2.3.1-	COMPONENTES PARA MEDIDOR BASADO EN RASPBERRY	64
2.3.2-	CONFIGURACIÓN DE RASPBERRY	66
2.3.3-	INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LAMP	68
2.4-	PROPUESTA FINAL.	70
2.5-	RESULTADOS.	72
3-	CAPÍTULO III: TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS.	74
3.1-	DEFINICIONES.	75
3.2-	ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE EL SALVADOR.	76
3.3-	REGISTROS DE LOS NIVELES DE RADIACIÓN SOLAR PROVENIENTES DE ESTUDIOS ANTERIORES.	81
3.4-	4 ADQUISICIÓN Y GENERACIÓN DE DATOS (PERÍODO 2009-2018.)	83
3.4.1-	DATOS OBTENIDOS DE LAS ESTACIONES	83
3.4.2-	GENERACIÓN DE DATOS	90
3.4.3-	FILTRADO DE DATOS	95
3.5-	CONVERSIÓN DE [HR] A [SR] USANDO EL ANÁLISIS ANGSTRÖM.	98
3.5.1-	MODELO DE ESTIMACIÓN DE ANGSTRÖM	98
3.5.2-	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ANGSRÖM	101
3.6-	MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN	102
3.6.1-	MÉTODOS GLOBALES	102
3.6.2-	MÉTODOS LOCALES BASADOS EN MEDIAS PONDERADAS	104
3.6.3-	DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN.	105
4-	CAPÍTULO IV: ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE RADIACIÓN SOLAR.	111
4.1-	GENERACIÓN DE MAPAS USANDO GMT Y QGIS.	112
4.1.1-	INTRODUCCIÓN A LOS SOFTWARES.	112
4.1.2-	GENERACIÓN DE LA INTERPOLACIÓN	120
4.1.3-	CREACIÓN Y EDICIÓN DE LOS MAPAS.	132
4.2-	GUÍA PARA GENERACIÓN DE UN MAPA.	143

4.4- MAPAS RESULTANTES	146
4.4.1- ANALISIS DE LOS MAPAS CON VALORES REALES DE RADIACION	160
4.5- COMPARACIÓN CON MAPAS ANTERIORES.	162
5- CONCLUSIONES	172
6- ANEXOS	174
6.1- Anexo A.	174
6.2- Anexo B.	180
6.2.1- Anexo B2.	191
6.3- Anexo C.	194
6.4- Anexo D.	202
6.5- Anexo E.	209
7- BIBLIOGRAFÍA.	220
8- CRÉDITOS DE IMÁGENES	222
8.1- CAPÍTULO I	222
8.2- CAPÍTULO II	223
8.3- CAPÍTULO III	224
8.4- CAPÍTULO IV	224

ÍNDICE DE IMÁGENES.

Figura 1-1 Movimiento de Rotación.....	18
Figura 1-2 Movimiento de Traslación	19
Figura 1-3 Componentes de la radiación sobre una superficie terrestre	21
Figura 1-4 Energía solar fotovoltaica.....	24
Figura 1-5 Energía solar térmica	25
Figura 1-6 Energía solar hibrida	25
Figura 1-7 Capacidad instalada hasta el 2018	27
Figura 1-8 Distribución eléctrica.....	29
Figura 1-9 Generación por recurso para el 2028.....	32
Figura 1-10 Capacidad instalada.....	33
Figura 1-11 Inyección por tipo de recurso	33
Figura 2-1 Piranómetro Second Class	35
Figura 2-2 Amplificador de Instrumentación AD625	36
Figura 2-3 Arduino ATmega2560	37
Figura 2-4 Arduino ATmega2560 más Shield Ethernet	39
Figura 2-5 Placa en PBC diseñada para los medidores.....	40
Figura 2-6 Configuración en modo ganancia fija del AD625	41
Figura 2-7 Esquema de construcción para la etapa de amplificación	42
Figura 2-8 Curva de la ganancia lineal del amplificador AD625.....	43
Figura 2-9 Proceso de construcción de los medidores.....	43
Figura 2-10 Placa para la implementación del circuito de los medidores.....	44
Figura 2-11 Presentación final de los medidores	44
Figura 2-12 Medidores construidos finalmente.....	45
Figura 2-13 Real Time Clock DS3231	47
Figura 2-14 Esquema de conexión del RTC al Arduino.	48
Figura 2-15 Regulador de voltaje L7805CT.	49
Figura 2-16 Funcionamiento del regulador de voltaje L7805CT.....	49
Figura 2-17 Pruebas de laboratorio.....	52
Figura 2-18 Pruebas de laboratorio.....	52
Figura 2-19 Pruebas de laboratorio.....	52
Figura 2-20 Comportamiento de la ganancia para el medidor 1.....	53
Figura 2-21 Comportamiento de la ganancia para el medidor 2.....	54

Figura 2-22 Comportamiento de la ganancia para el medidor 3.....	54
Figura 2-23 Radiación solar del día 09/11/2019 datos minuto a minuto.....	56
Figura 2-24 Radiación solar del día 09/11/2019 promedios cada hora	56
Figura 2-25 Radiación solar del día 10/11/2019 datos minuto a minuto.....	56
Figura 2-26 Radiación solar del día 10/11/2019 promedios cada hora	57
Figura 2-27 Radiación solar del día 11/11/2019 datos minuto a minuto.....	57
Figura 2-28 Radiación solar del día 11/11/2019 promedios cada hora	57
Figura 2-29 Radiación solar del día 04/11/2019 datos minuto a minuto.....	58
Figura 2-30 Radiación solar del día 04/11/2019 promedios cada hora	58
Figura 2-31 Radiación solar del día 05/11/2019 datos minuto a minuto.....	59
Figura 2-32 Radiación solar del día 05/11/2019 promedios cada hora	59
Figura 2-33 Radiación solar del día 06/11/2019 datos minuto a minuto.....	59
Figura 2-34 Radiación solar del día 06/11/2019 promedios cada hora	60
Figura 2-35 Radiación solar del día 12/10/2019 datos minuto a minuto.....	60
Figura 2-36 Radiación solar del día 12/10/2019 promedios cada hora	61
Figura 2-37 Radiación solar del día 13/10/2019 datos minuto a minuto.....	61
Figura 2-38 Radiación solar del día 13/10/2019 promedios cada hora	61
Figura 2-39 Radiación solar del día 24/10/2019 datos minuto a minuto.....	62
Figura 2-40 Radiación solar del día 24/10/2019 promedios cada hora	62
Figura 2-41 Grafica con valores de energía de la Tabla 2-2.	63
Figura 2-41 Raspberry Pi Modelo 3 B+.	64
Figura 2-42 Modulo A/D basado en chip MCP3424.	65
Figura 2-43 Modulo UPS para Raspberry.	66
Figura 2-44 Archivo de texto editado y configurado.	67
Figura 2-45 Archivo de texto editado y configurado.	68
Figura 2-46 Pagina por defecto de Apache, consultada desde un navegador.	69
Figura 2-47 Estación de monitoreo: Modelo MLA20.v1.....	70
Figura 2-48 Radiación solar del día 01/01/2020.....	72
Figura 2-49 Radiación solar del día 04/05/2020.....	73
Figura 2-50 Radiación solar del día 10/11/2020.....	73
Figura 3-1 Red Meteorológica de El Salvador (SNET).....	76
Figura 3-2 Ubicación de las estaciones que cuentan con datos de HR.	79
Figura 3-3 Estaciones de estudio para la actualización del mapa de radiación. ...	80
Figura 3-4 Estación A-18 Los Andes.....	84

Figura 3-5 Ubicación de la Estación A-31.	86
Figura 3-6 Ubicación de la estación A-37.	87
Figura 3-7 Ubicación de la estación G-03.	88
Figura 3-8 Ubicación de la estación L-04.	89
Figura 3-9 Niveles de luz solar enero 2014 estación A-18.	96
Figura 3-10 Niveles de luz solar del 2014 de la estación A-18.	96
Figura 3-11 Interpolación mediante Distancia Inversa Ponderada.	106
Figura 3-12 Interpolación mediante Krigng.	108
Figura 3-13 Interpolación mediante Spline.	109
Figura 4-1 Línea de comandos de GMT.	113
Figura 4-2 Interfaz de QGIS.	120
Figura 4-3 Área de interpolación.	123
Figura 4-4 Cuadrículas de 5km ²	123
Figura 4-5 Interpolación con T=1	124
Figura 4-6 Interpolación con T=0.5	124
Figura 4-7 Interpolación con T=0	124
Figura 4-8 Monitoreo de GMT surface.	125
Figura 4-9 Interpolación omitiendo la estación A-18	128
Figura 4-10 Interpolación omitiendo la estación A-31	129
Figura 4-11 Distribución de enero, febrero y marzo.	132
Figura 4-12 Georreferenciación del proyecto.	133
Figura 4-13 Barra de navegación.	134
Figura 4-14 Panel de capas.	134
Figura 4-15 Interpolación de enero en QGIS	135
Figura 4-16 Selección de la rampa de color.	136
Figura 4-17 Resultado del cambio de color.	136
Figura 4-18 Agregando límites a la interpolación.	137
Figura 4-19 Recorte de la interpolación.	138
Figura 4-20 Modificación del recorte.	138
Figura 4-21 Incorporación de la hidrografía.	139
Figura 4-22 Imagen satelital.	139
Figura 4-23 Nueva composición de impresión.	140
Figura 4-24 Membrete del mapa final.	140
Figura 4-25 Inserción del mapa en la hoja de impresión.	141

Figura 4-26 Niveles de radiación de noviembre y diciembre.....	141
Figura 4-27 Generalizando la rampa de colores.	142
Figura 4-28 Resultado de la edición del mapa.	143
Figura 4-29 Mapa de radiación solar de enero.....	147
Figura 4-30 Mapa de radiación solar de febrero.....	148
Figura 4-31 Mapa de radiación solar de marzo.	149
Figura 4-32 Mapa de radiación solar de abril.	150
Figura 4-33 Mapa de radiación solar de mayo.	151
Figura 4-34 Mapa de radiación solar de junio.	152
Figura 4-35 Mapa de radiación solar de julio.....	153
Figura 4-36 Mapa de radiación solar de agosto.	154
Figura 4-37 Mapa de radiación solar de septiembre.	155
Figura 4-38 Mapa de radiación solar de octubre.	156
Figura 4-39 Mapa de radiación solar de noviembre.	157
Figura 4-40 Mapa de radiación solar de diciembre.	158
Figura 4-41 Mapa de radiación solar de promedio anual.	159
Figura 4-42 Resultado de la edición del mapa.	161
Figura 4-43 Comportamiento de la radiación solar promedio anual.	162
Figura 4-44 Zonas geográficas de El Salvador.	163
Figura 4-45 Comparación del mapa anual.	164
Figura 4-46 Comparación del mapa de febrero.....	166
Figura 4-47 Comparación del mapa de junio.....	167
Figura 4-48 Comparación de los valores mínimos de radiación.....	168
Figura 4-49 Comparación de los valores máximos de radiación.....	169
Figura 4-50 Comparación de los 4 mapas anuales.....	169
Figura 6-1 Ubicación del medidor M1.....	180
Figura 6-2 Edificio donde se encuentra instalado el medidor M1.....	181
Figura 6-3 Edificio donde se encuentra instalado el medidor M1.....	181
Figura 6-4 Piranómetro con constante de calibración: 19.07 $\mu\text{Vm}^2/\text{W}$	182
Figura 6-5 Instalación del piranómetro.	182
Figura 6-7 Ubicación del medidor M2.....	183
Figura 6-8 Edificio donde se encuentra instalado el medidor M2.....	184
Figura 6-9 Edificio donde se encuentra instalado el medidor M2.....	184
Figura 6-10 Piranómetro con constante de calibración: 17.00 $\mu\text{Vm}^2/\text{W}$	185

Figura 6-11 Instalación del piranómetro.	185
Figura 6-12 Medidor M2, instalado en la sala de reuniones del decanato.	186
Figura 6-13 Ubicación del medidor M3.	187
Figura 6-14 Edificio donde se encuentra instalado el medidor M3.	188
Figura 6-15 Edificio donde se encuentra instalado el medidor M3.	188
Figura 6-16 Piranómetro con constante de calibración: 16.40 uV/m ² /W.	189
Figura 6-17 Instalación del piranómetro.	189
Figura 6-18 Medidor M3, instalado en la segunda planta de la biblioteca, solón de Administración.	190
Figura 6-19 Interpolación correspondiente al mes de ENERO.	202
Figura 6-20 Interpolación correspondiente al mes de FEBRERO.	202
Figura 6-21 Interpolación correspondiente al mes de MARZO.	202
Figura 6-22 Interpolación correspondiente al mes de ABRIL.	203
Figura 6-23 Interpolación correspondiente al mes de MAYO.	203
Figura 6-24 Interpolación correspondiente al mes de JUNIO.	203
Figura 6-25 Interpolación correspondiente al mes de JULIO.	203
Figura 6-26 Interpolación correspondiente al mes de AGOSTO.	204
Figura 6-27 Interpolación correspondiente al mes de SEPTIEMBRE.	204
Figura 6-28 Interpolación correspondiente al mes de OCTUBRE.	204
Figura 6-29 Interpolación correspondiente al mes de NOVIEMBRE.	204
Figura 6-30 Interpolación correspondiente al mes de DICIEMBRE.	205
Figura 6-31 Interpolación promedio ANUAL.	205
Figura 6-32 Interpolación correspondiente al año 2009.	205
Figura 6-33 Interpolación correspondiente al año 2010.	206
Figura 6-34 Interpolación correspondiente al año 2011.	206
Figura 6-35 Interpolación correspondiente al año 2012.	206
Figura 6-36 Interpolación correspondiente al año 2013.	206
Figura 6-37 Interpolación correspondiente al año 2014.	207
Figura 6-38 Interpolación correspondiente al año 2015.	207
Figura 6-39 Interpolación correspondiente al año 2016.	207
Figura 6-40 Interpolación correspondiente al año 2017.	207
Figura 6-41 Interpolación correspondiente al año 2018.	208
Figura 6-42 Mapa de radiación solar del 2009.	210
Figura 6-43 Mapa de radiación solar del 2010.	211

Figura 6-44 Mapa de radiación solar del 2011.	212
Figura 6-45 Mapa de radiación solar del 2012.	213
Figura 6-46 Mapa de radiación solar del 2013.	214
Figura 6-47 Mapa de radiación solar del 2014.	215
Figura 6-48 Mapa de radiación solar del 2015.	216
Figura 6-49 Mapa de radiación solar del 2016.	217
Figura 6-50 Mapa de radiación solar del 2017.	218
Figura 6-51 Mapa de radiación solar del 2018.	219

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1-1 Proyectos confirmados a partir del 2019	27
Tabla 1-2 Proyectos candidatos	28
Tabla 1-3 Generación estimada 2028	28
Tabla 1-4 Generación FV a pequeña escala.....	30
Tabla 1-5 Generación FV a gran escala 100MW.	31
Tabla 1-6 Generación FV a gran escala 170MW.	31
Tabla 1-7 Generación FV en el mercado minorista.	31
Tabla 2-1 Comparación del coeficiente de Pearson para los tres medidores	55
Tabla 2-2 Valores de energía promedio diaria, generada con los medidores instalados.	63
Tabla 2-3 Comparación entre Arduino y Raspberry PI.....	71
Tabla 3-1 Estaciones de interés en la Red Meteorológica de El Salvador.	77
Tabla 3-2 Estaciones que registran Luz Solar (H).....	78
Tabla 3-3 Niveles de Radiación solar (períodos 1969-1983, 1984-2004).	81
Tabla 3-4 Niveles de Radiación Solar (período 2005-2013).....	82
Tabla 3-5 Datos de Hora sol de los meses de enero y febrero de la estación A-18.	84
Tabla 3-6 Promedios mensuales de las horas sol diaria de la estación A-18.	85
Tabla 3-7 Promedios mensuales de horas sol diaria de la estación A-31.....	86
Tabla 3-8 Promedios mensuales de hora sol diaria correspondiente a la estación A-37	87
Tabla 3-9 Promedios mensuales de hora sol diaria correspondiente a la estación G-03.	89
Tabla 3-10 Promedios mensuales de hora sol diaria para la estación L-04.	90
Tabla 3-11 Niveles de horas de luz solar promedio mensuales y anual.....	97
Tabla 3-12 Niveles de horas de luz solar promedio de los últimos 10 años.....	97
Tabla 3-13 Duración Astronómica promedio del día	99
Tabla 3-14 Radiación extraterrestre promedio [Hc].....	100
Tabla 3-15 Coeficientes Angstróm.	100
Tabla 3-16 Radiación Solar promedio mensual [kWh/m ²].	101
Tabla 3-17 Radiación Solar promedio anual [kWh/m ²].....	101

Tabla 4-1 Datos de Radiación Solar promedio mensual y anual de los últimos 10 años (2009-2018) [kWh/m ²].	122
Tabla 4-2 Datos de Radiación Solar promedio anual de cada uno de los últimos 10 años (2009-2018) [kWh/m ²].	122
Tabla 4-3 Valores máximos y mínimos de las interpolaciones	126
Tabla 4-4 Radiación solar del mes de enero	128
Tabla 4-5 Validación de la interpolación del mes de enero	129
Tabla 4-6 Error de estimación para los mapas mensuales y el anual.	130
Tabla 4-7 Error de estimación para los mapas de promedios anuales.	130
Tabla 4-8 Error promedio por estación	131
Tabla 4-9 Niveles anuales por departamento	160
Tabla 4-10 Error de interpolación	161
Tabla 4-11 Comparación del mapa anual	170
Tabla 6-1 Estaciones de la Red Meteorológica de El Salvador y los parámetros que registran.	194

INTRODUCCIÓN

La presente investigación está orientada a poder actualizar el mapa de radiación solar de El Salvador. En la actualidad los datos existentes, así como los mapas de radiación solar del país corresponden al año 2014; año en el que se presentó el trabajo de investigación “*Actualización del Mapa de Radiación Solar de El Salvador*. Universidad de El Salvador. (Méndez, Carlos et al., 2014)”. El proceso de análisis de datos de dicha investigación se realizó de forma diferente a la descrita en este trabajo, puesto que el método de interpolación de datos utilizado en la investigación de 2014 fue el método de KRIGING, auxiliándose de los mapas de vida proporcionados por el proyecto SWERA. La presente investigación utilizó el método de interpolación CURVATURA MINIMA SPILINE, ya que por medio de la observación se determinó que un modelado de curva es una mejor representación del fenómeno de Irradiancia. Con la colaboración de La GEO se obtuvo acceso a 2 estaciones más, con datos del periodo 2017 – 2018, que, junto con los medidores construidos en esta investigación, se utilizó el proceso de validación cruzada para validar los datos generados para la construcción de los mapas de irradiancia.

Así también en esta investigación se presenta un prototipo de medidor de irradiancia de bajo costo. con el objetivo de crear una base de datos local de fácil acceso para investigaciones futuras, y poder elegir en base a criterios propios la ubicación de los puntos de medición ya que las estaciones consultadas para el estudio actual no se encuentran ubicadas de forma uniforme en el país, presentando grandes áreas de territorio sin datos proporcionados por una estación. Las bases para la construcción de un medidor de irradiación de bajo costo se tomaron a partir del trabajo elaborado para la asignatura Proyecto de Ingeniería. En dicho trabajo se modeló el medidor basado en una placa arduino y una etapa amplificadora basada e integrado AD625. En vista a las desventajas y resultados que se obtuvieron se pensó en una mejora que fuera capaz de dar solución y mejorar el rendimiento del medidor. Con base a lo descrito, en esta investigación se construyó un medidor basado en una placa Raspberry y una etapa amplificadora basada en el integrado MCP3424.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL.

- Construcción de un medidor de irradiancia confiable y de bajo costo.
- Actualización del Mapa de Irradiancia Solar de El Salvador.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir un medidor de irradiancia de bajo costo, basado en raspberry pi.
- Consultar el medidor construido de manera remota.
- Construir los mapas actualizados de irradiancia solar promedio de El Salvador.
- Sentar las bases para el desarrollo de un sistema de monitoreo estable y confiable

1-CAPÍTULO I: RECURSO SOLAR.

El Sol, la estrella de nuestro Sistema Solar, es la fuente más importante de energía del planeta. Su energía se manifiesta de diversas formas, siendo las principales la luz y el calor. Asimismo, constituye el motor de la vida, de los fenómenos climáticos y de ella provienen innumerables recursos energéticos.

1.1- LA TIERRA Y SUS MOVIMIENTOS RESPECTO AL SOL.

MOVIMIENTO DE ROTACIÓN.

La rotación es el movimiento por el cual existen los días y las noches, y cada rotación tiene una duración de prácticamente un día (23 horas 56 minutos y 4.1 segundos).

No existe un único descubridor de la existencia de este movimiento, aunque el primero que hizo una propuesta firme al respecto fue Johannes Müller en el siglo XV, aunque no fue hasta más tarde, con la ayuda de Copérnico y Newton, cuando la existencia de la rotación terrestre quedó totalmente demostrada.

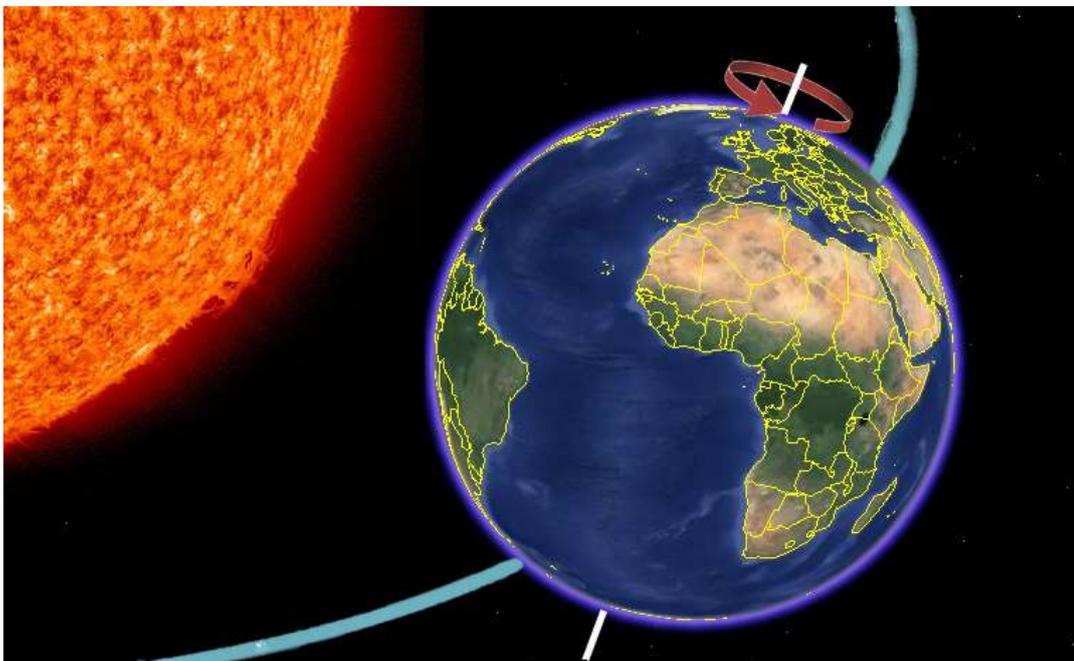


Figura 1-1 Movimiento de Rotación. Quijano (2015)

MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN.

Se define como el movimiento que hace la Tierra en torno al sol, describiendo una elipse que tarda en ser recorrida 365 días, 5 horas y 47 minutos. Debido al hecho de recorrer una órbita, la Tierra varía su distancia respecto al sol mientras describe esta trayectoria, dándose el perihelio (punto más cercano al sol) los primeros días de enero, y el afelio (punto más alejado del sol) los primeros días de Julio.

El primero en proponer firmemente la existencia de este movimiento fue el griego Filolao de Crotona, aunque los seguidores de la teoría geocéntrica mantuvieron este pensamiento enterrado hasta que en el siglo XVI Copérnico revolucionó la astronomía con su modelo heliocéntrico que, pese a no ser el primero, sí que fue el primero en recibir un gran apoyo y respeto por la sociedad de la época.

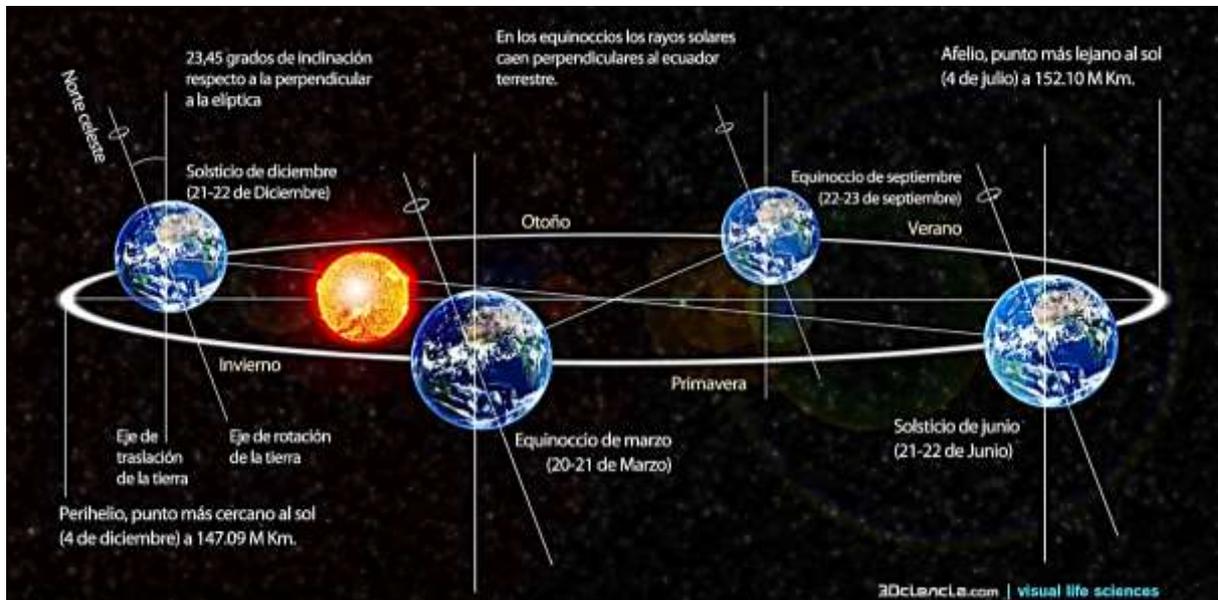


Figura 1-2 Movimiento de Traslación. Fcpogeografía (2013).

1.2- EL SOL COMO FUENTE DE ENERGÍA.

1.2.1- GEOMETRÍA SOLAR.

Declinación solar:

El ángulo formado por la línea que une los centros del Sol y la Tierra y el plano ecuatorial cambia constantemente. Este ángulo se llama declinación solar.

Existen muchas formas de calcular la declinación solar, la más usada es la propuesta por Spencer (1971):

$$\begin{aligned} \delta(^{\circ}) = & 0.006918 + 0.39912(\cos \Gamma) + 0.070257(\sin \Gamma) + 0.006758(\cos 2\Gamma) \\ & + 0.000907(\sin 2\Gamma) - 0.002697(\cos 3\Gamma) \\ & + 0.00148 \left(\sin \frac{3\Gamma * 180}{\pi} \right) \quad \text{Ec. 1.2.1} \end{aligned}$$

Esta expresión, en radianes, donde Γ es el ángulo diario y está dado por:

$$\Gamma = 2 * \pi \frac{dn - 1}{365} \quad \text{Ec. 1.2.2}$$

Donde dn representa el día juliano del año, es decir, se trata de una ordenación ordinaria de los días del año asignando como dn igual a 1 al 1° de Enero, dn igual a 32 al 1° de Febrero, y así sucesivamente hasta llegar a dn igual a 365 que corresponde al 31 de diciembre.

Ecuación del tiempo:

Es la diferencia existente entre el día solar medio y el día solar verdadero. Esa diferencia es variable debido a la excentricidad de la órbita terrestre y a la constancia de la velocidad areolar (2ª ley de Kepler). También influyen otros movimientos del planeta Tierra (precesión y nutación, sobre todo).

La aproximación a la Ecuación del Tiempo de Spencer (1971), con error máximo de unos 2.333 minutos es:

$$\begin{aligned} E_t = \frac{229.2}{60} [& 0.000075 + 0.001868(\cos \Gamma) - 0.0303077(\sin \Gamma) - 0.0141615(\cos 2\Gamma) \\ & + 0.0489(\sin 2\Gamma)] \quad \text{Ec. 1.2.3} \end{aligned}$$

Ángulo Horario [ω]:

Desplazamiento angular del Sol en el plano del ecuador celeste. En la mañana ω será negativo, y positivo por la tarde. $\omega = \text{TSV} \cdot 15$, donde [TSV] Tiempo Solar Verdadero es el tiempo basado en el movimiento aparente del Sol en la bóveda celeste.

$$\omega_s = \text{acos} ((-\tan(\delta)) * \tan(\phi)) \quad \text{Ec. 1.2.4}$$

Ángulo Cenital del Sol [θ_z]:

El ángulo cenital es aquel que forma la vertical del observador con la línea observador – Sol. Se calcula empleando la expresión del ángulo de incidencia con la simplificación correspondiente.

$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta) * \cos(\phi) * \cos(\omega) + \text{sen}(\delta) * \text{sen}(\phi) \quad \text{Ec. 1.2.5}$$

Altura del Sol [α] Es el complementario del ángulo cenital $\alpha = 90^\circ - \theta$

Ángulo Acimutal del Sol [γ] Es el ángulo diedro que forma el meridiano del lugar con el que pasa por el sol. Sobre el plano del horizonte produce un ángulo llano con el mismo nombre. El acimut hacia el Este es negativo, y hacia el Oeste positivo. La posición del Sol queda determinada por el ángulo cenital (o la altura solar) y el acimut. Se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\text{sen}(\gamma) = \frac{\text{sen}(\omega) * \cos(\delta)}{\text{sen}(\theta)} \quad \text{Ec. 1.2.6}$$



Figura 1-3 Componentes de la radiación sobre una superficie terrestre

Irradiancia extraterrestre viene afectada por la corrección de la distancia Tierra-Sol (ϵ) y por el ángulo que forma los rayos solares con el plano horizontal (altura α) se expresa de la siguiente manera:

$$I_0 = I_{cs} * \epsilon * \text{sen}(\alpha) \quad \text{Ec. 1.2.7}$$

Donde ϵ es la corrección de la distancia tierra sol y I_{cs} constante solar.

1.2.2- EVALUACIÓN DEL RECURSO SOLAR

La evaluación del recurso solar se utiliza como herramienta para la predicción siendo esta una estimación de la radiación incidente en determinado tiempo para determinar la forma en que operará la planta. La radiación recibida por el captador solar es menor que la captada en la atmósfera esta se debe a factores que afectan entre estos se encuentran:

- A. Moléculas gaseosas de la atmósfera.
- B. Aerosoles suspendidos, como puede ser polución, incendios, desiertos.
- C. Condensación del vapor del agua.

Los primeros dos considerados con un impacto leve o moderado y el último entre moderado a alto que afectan la captación solar por tal razón.

1.3- APLICACIONES APROVECHANDO EL RECURSO SOLAR.

La energía solar se clasifica dependiendo de las características de su tecnología, en función de cómo capturan, convierte y distribuye la energía solar. Por lo tanto, estas tecnologías se dividen principalmente en energía solar pasiva y energía solar activa.

1.3.1- ENERGÍA SOLAR PASIVA.

La energía solar pasiva es aquella que se encarga de aprovechar la energía de forma directa sin transformarla en ningún otro tipo de energía secundaria. Esto se consigue mediante la utilización inmediata, o también para almacenar dicha energía generada sin la necesidad de usar algún sistema mecánico de energía adicional. En el diseño de edificios solares pasivos, las ventanas, paredes y pisos están hechos para recolectar, almacenar y distribuir energía solar en forma de calor en el invierno y rechazar el calor solar en el verano.

La energía solar pasiva tiene sistemas con ganancia directa e indirecta para calentar espacios, sistemas de calentamiento de agua basados en un termosifón, el uso de una masa térmica y de materiales con cambio de fase que sirve para suavizar los cambios de la temperatura del aire, las cocinas o las chimeneas solares que ayudan a mejorar la ventilación natural. También funciona en otros sistemas como los hornos o las fraguas solares, aunque éstos requieren un determinado consumo de energía para alinear espejos concentradores o receptores.

En la actualidad se utiliza mayormente en los hogares para la calefacción y producción de agua caliente sin necesidad de utilizar equipos para lo mismo. Son muchos los hogares que se construyen con técnicas especiales y de esta forma lograr que la casa se mantenga caliente utilizando los rayos de sol. Sin embargo, debemos destacar que la energía solar pasiva es utilizada como complemento en la mayoría de los casos, ya que en zonas muy frías es necesario de equipos extras para poder generar toda la energía necesaria en el hogar o establecimientos.

La energía solar pasiva se caracteriza por su bajo coste para la realización de su trabajo. A veces, este coste es incluso nulo. El coste del mantenimiento es muy

reducido. Durante su funcionamiento no se emiten gases de efecto invernadero. A pesar de ello, se continúa trabajando para una mejor optimización del rendimiento y beneficio económico.

1.3.2- ENERGÍA SOLAR ACTIVA.

La energía solar activa, utiliza diferentes tipos de captadores solares para transformar el calor y la radiación en energía útil, como la fotovoltaica o solar-térmica.

Los tipos de energía solar en que se divide la energía solar activa son:

ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA: Este tipo de tecnología solar sirve para producir electricidad a partir de la radiación del sol mediante un dispositivo llamado célula fotovoltaica. Es el tipo de energía solar más comercial, pues su aplicación va desde proporcionar energía eléctrica a aparatos independientes hasta alumbrar completamente una casa, alumbrado público o toda una ciudad mediante una planta de energía solar fotovoltaica.

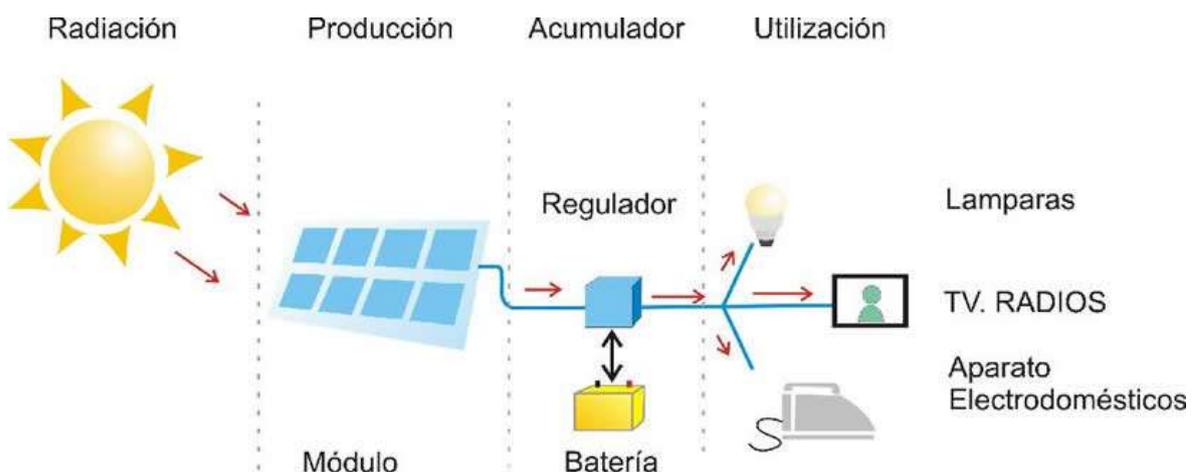


Figura 1-4 Energía solar fotovoltaica. SFVI (2019)

ENERGÍA SOLAR TÉRMICA: Mediante colectores solares, este tipo de tecnología solar aprovecha la radiación solar para convertirla en calor y transferirla a un fluido que se utilizará para brindar agua caliente, calefacción o mover turbinas para generar electricidad.

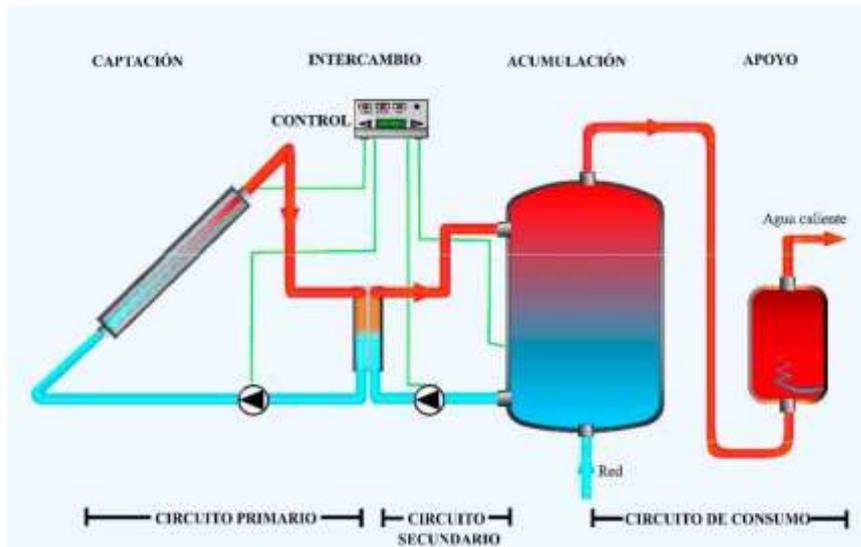


Figura 1-5 Energía solar térmica. Fbiosolenergia (2013)

ENERGÍA SOLAR HÍBRIDA: Esta tecnología combina cualquier tipo de energía solar con otro tipo de energía, sea renovable o no renovable, lo que le otorga mayor eficiencia al no depender totalmente del sol.

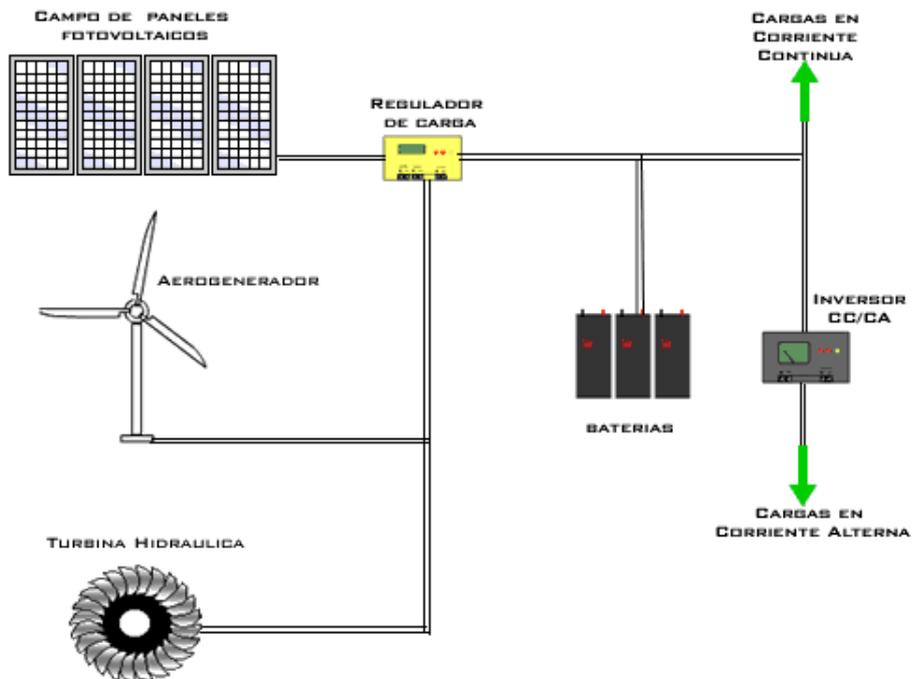


Figura 1-6 Energía solar híbrida. Fenergias (2009)

1.4- SECTOR ELÉCTRICO DEL PAÍS.

A través de los años el mercado eléctrico salvadoreño ha ido experimentando diferentes cambios hasta llegar a lo que es actualmente, en los años 40's fueron construidas las primeras presas hidroeléctricas, la generación de energía en su mayoría estaba en manos del estado, en la década de los 90's diferentes reformas cambiaron el rol del estado las cuales resultaron en transformaciones estructurales por tal razón nacieron instituciones que se encargarían de regular el mercado fue como el mercado energético de El Salvador surgió.

El mercado se fragmento y resulto en los siguientes agentes que lo componen:

- A) Empresas generadoras.
- B) Agente transmisor
- C) Empresas distribuidoras
- D) Comercializador de energía eléctrica
- E) Operador del mercado
- F) Regulador del mercado

El sector eléctrico de El Salvador se divide en cuatro principales sectores, los cuales se detallan a continuación.

1.4.1- GENERACIÓN.

Actualmente El Salvador cuenta con un parque de generación con un enfoque de crecimiento con respecto a las energías renovables que se compone de diversas fuentes.

El CNE en la publicación del estudio de 2019 presenta la capacidad instalada hasta el 2018 Figura 1-7.

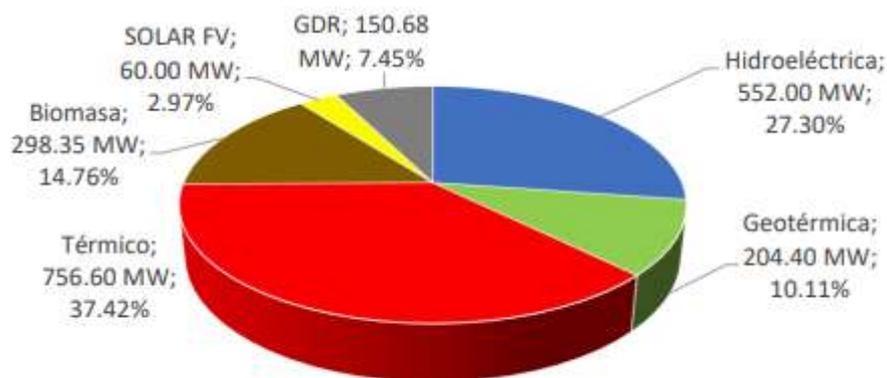


Figura 1-7 Capacidad instalada hasta el 2018. CNE (2019)

Se muestra además una tabla con una serie de proyectos que entraron a funcionar a partir del 2019.

Tabla 1-1 Proyectos confirmados a partir del 2019

Proyectos	Recurso	Fecha	Potencia (MW)	Inversión (\$/kW)
Trinidad (46 KV)	SFV	1/2/2019	8.0	2800.0
Trinidad (34.5KV)	SFV	1/2/2019	6.0	2800.0
Trinidad (115 KV)	SFV	1/2/2019	20.0	1900.0
Capella Solar	SFV	1/4/2020	100.0	1500.0
EcoSolar	SFV	1/4/2020	9.9	1515.0
Sonsonate Energía	SFV	1/4/2020	10.0	1500.0
Chaparral	Hidro	1/1/2021	65.7	2283.0
VENTUS	Eólica	1/4/2020	50.0	2200.0
Energía del Pacífico	GNL	1/7/2021	380.0	2116.0

Se cuenta con proyectos que tienen alguna posibilidad de instalarse debido a que poseen estudios de factibilidad o, en otros casos, sus propietarios han manifestado que estos tienen una alta probabilidad de desarrollo.

Tabla 1-2 Proyectos candidatos

Nombre	Recurso	Fecha opcional	Potencia (MW)	Inversión (\$/kW)	O&M(%del valor de Inversión)
Berlín U5	Geotérmica	1/1/2021	8.0	6,500	1% - 2%
Eólico CEL	Eólica	1/1/2022	40.0	2,631	2% - 4 %
Ahuachapán U4	Geotérmica	1/12/2023	6.0	6,500	1% - 2%
Chinameca	Geotérmica	1/1/2023	8.0	6,500	1% - 2%
Motor 1	Bunker	1/1/2023	100.0	2,631	1% - 2%
Motor 2	Bunker	1/1/2023	100.0	2,631	1%
Motor GNL	GNL	1/1/2023	150.0	1,338	1% - 3%
Solar 1	SFV	1/1/2023	50.0	700	1% - 3%
Solar 2	SFV	1/1/2023	15.0	700	1% - 3%
Solar 3	SFV	1/1/2023	60.0	700	1% - 3%
Solar 4	SFV	1/1/2023	20.0	700	1% - 3%
Solar 5	SFV	1/1/2023	80.0	700	1% - 3%
Solar 6	SFV	1/1/2023	25.0	700	1% - 2%
San Vicente	Geotérmica	1/1/2024	8.0	6,500	1% - 2%
Berlín U6	Geotérmica	1/1/2026	28.0	6,500	1% - 2%
Ampliación Chinameca	Geotérmica	1/1/2026	34.0	6,500	1% - 2%
Ampliación San Vicente	Geotérmica	1/1/2026	14.0	6,500	1% - 2%

Por tanto, para el 2028 se estima haber concluido con la incorporación de todas estas plantas en el parque energético de El Salvador, la Tabla 1-3, muestra una estimación de los datos de generación para el 2028.

Tabla 1-3 Generación estimada 2028

Recursos	Escenario Sin nuevos Proyectos (GWh)	Escenario Base (GWh)
Hidro	2016.48	1993.33
Geo	1425.59	1425.37
Biomasa	519.10	519.10
Solar	117.60	900.53
Eólica	0.00	150.78
GNL	0.00	929.57
Bunke&Diesel	1889.70	8.55
ImpNetas	1467.30	1466.20

1.4.2- TRANSMISIÓN.

ETESAL es el responsable del mantenimiento y la expansión del sistema de energía eléctrica en el Salvador, toda la red de interconexión con el SIEPAC y transmisión salvadoreña les pertenece.

Actualmente cuenta con 40 líneas de 115 KV con una longitud de 1,072.48 km.

1.4.3- DISTRIBUCIÓN.

La distribución eléctrica está a cargo de 5 empresas a continuación el mapa de operación de cada una de ellas en el país.



Figura 1-8 Distribución eléctrica.

Su finalidad principal es la entrega de energía eléctrica a redes de bajo voltaje, se encargan del mantenimiento a la infraestructura, la ampliación de redes y operan en condiciones que garanticen condiciones reguladas de tarifas y calidad de entrega.

1.4.4- COMERCIALIZACIÓN.

Son los agentes encargados de comercializar compra y venta de energía a nivel regional esto con la finalidad de satisfacer las necesidades de los usuarios finales, están sujetos a las normativas del SIEPAC como a las normativas nacionales.

1.5- ENERGÍAS RENOVABLES EN EL SALVADOR Y SU IMPACTO.

El Salvador depende cada vez menos del petróleo para generar su energía. Según datos de la Unidad de Transacciones (UT) del sistema eléctrico, este recurso se ha reducido a la mitad en los últimos diez años, ya que sus inyecciones a la red han pasado de representar un 40.4 % de la matriz energética en noviembre de 2010 a solo 19.43 % en noviembre de 2019.

La reducción se debe a la incorporación de nuevas fuentes energéticas como la biomasa (a través del bagazo de la caña) y la solar que, a pesar de tener juntas un porcentaje menor al 10%, han logrado restar participación de la fuente térmica, por la que se paga más dinero.

Actualmente el CNE está impulsando políticas para incentivar la inversión en proyectos de recursos solares no convencionales conectados a la red de distribución. En este proceso se adjudicaron 32 plantas de generación a pequeña escala. A continuación, se presenta la lista de las empresas adjudicadas condichos proyectos.

Tabla 1-4 Generación FV a pequeña escala.

Empresa Participante	Potencia (KW)	Tecnología
Hilcasa Energy	1200	Fotovoltaico
Grupo Arquero	1200	Fotovoltaico
Solar Internacional	1200	Fotovoltaico
Grupo Roca	1200	Fotovoltaico
PV Gen	1200	Fotovoltaico
Solaris Energy (EDECESA)	800	Fotovoltaico
HELIOTEC 2006 S.L.	1200	Fotovoltaico
Gran Solar	1200	Fotovoltaico
Alpha Solar	800	Fotovoltaico
CODESA	800	Fotovoltaico
ELECSA	400	Fotovoltaico
Agrícola ONZA S.A. de C.V.	300	Biogás
Agrosania	150	Biogás
PCH San Martin	375	PCH
Velesa Energy S.A. de C.V.	120	PCH
Total (kW)	12,145	

Gran escala por 100 MW

Tabla 1-5 Generación FV a gran escala 100MW.

Empresa Adjudicada	Potencia (MW)	Tecnología
UDP Neoen-Almaval	60	Fotovoltaico
UDP Proyecto La Trinidad	8	Fotovoltaico
UDP Proyecto La Trinidad	6	Fotovoltaico
Solar Reserve Development Co. II LLC	20	Fotovoltaico
Total (MW)	94	

Gran escala 170 MW

Tabla 1-6 Generación FV a gran escala 170MW.

Empresa Adjudicada	Potencia (MW)	Tecnología
Capella Solar	50	Fotovoltaico
Capella Solar	50	Fotovoltaico
Sociedad Sonsonate Energía	10	Fotovoltaico
Asocio Ecosolar	9.9	Fotovoltaico
Tracia Network	50	Eólico
Total (MW)	169.9	

Proyectos de energía para venta en el mercado minorista.

Tabla 1-7 Generación FV en el mercado minorista.

Empresa	Ubicación	Capacidad (MW)
AES Moncagua	San Miguel	2.55
Hilcasa Energy	Apopa	2.52
Spica	La Paz	20
La Independencia	La Libertad	10
AES Bósforo Pasaquina	Pasaquina	10
Parque Industrial El Progreso	Santa Tecla	1.2
Parque Industrial Intercomplex	Lourdes	1.5
AES Bósforo La Unión	La Unión	10
AES Bósforo El Carmen	La Unión	10
INDUFOAM	Ciudad Arce	2.64
SFV Peña Moreno	San Salvador	0.45
Hilcasa - Grupo Siman	Apopa	1.43
Zona Franca San Bartolo	Ilopango	0.32
SARAM - Alimentos MOR	Sonsonate	0.14
ECTROPA	Sonsonate	0.1
Metrocentro Santa Ana - Inversiones y Desarrollo Energético	Santa Ana	1.78
AES Bósforo Jiquilisco	Usulután	10
Las Mesas 1	San Miguel	7.5
Las Mesas 2	San Miguel	5
AES Bósforo Sonsonate	Sonsonate	10
	TOTAL	107.13

Cada vez más el país apuesta a la sustentabilidad energética buscando la disminución de las emisiones de dióxido de carbono para contribuir como país a disminuir los efectos del calentamiento global.

El CNE para el 2028 apuesta un gran incremento a las energías renovables alternativas en la Figura 1-9 podemos ver como con la implementación los proyectos propuestos la energía solar pasaría a representar un 12.18% en la matriz energética.

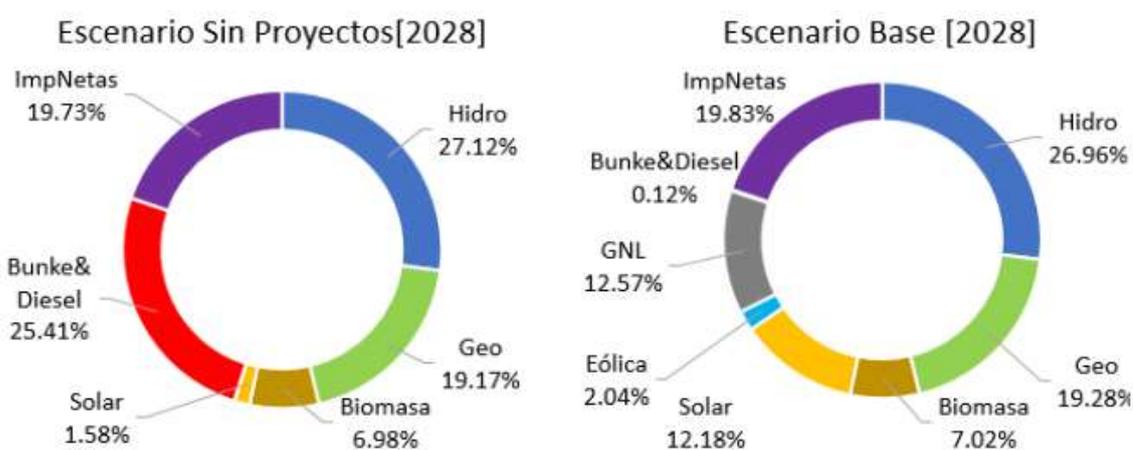


Figura 1-9 Generación por recurso para el 2028. CNE (2019)

Por tanto, la energía solar es un recurso potencial para su explotación en el territorio salvadoreño a gran, mediana y pequeña escala ya que se han identificado diversos proyectos de generación de energía solar fotovoltaica para autoconsumo en su mayoría aislados con bancos de batería. Por otra parte, también hay proyectos de sistemas fotovoltaicos conectados a la red para autoconsumo en su mayoría universidades, escuelas y edificios gubernamentales. Los proyectos suman alrededor de los 27,139.08 kW datos proporcionados por el CNE.

La capacidad instalada reportada por los operadores de la Unidad de Transacciones, al 31 de diciembre del 2019, ascendía 2001.81 MW, superando en 7% la capacidad instalada del 2018 que era de 1871.31 MW, el incremento en la potencia instalada para el 2019 se debe a la puesta en operación de proyectos fotovoltaicos por 134 MW.

En las siguientes figuras se muestra la capacidad instalada y las inyecciones a la red por tipo de recurso en los años 2018 y 2019, según reportes de la Unidad de Transacciones.

GENERADORAS	CAPACIDAD INSTALADA				VARIACIÓN	
	2018		2019			
	(MW)	(%)	(MW)	(%)		
HIDRÁULICA	552.69	30%	552.69	28%	→	0%
GEOTÉRMICA	204.40	11%	204.40	10%	→	0%
FÓSIL	757.12	40%	757.12	38%	→	0%
BIOMASA	297.10	16%	293.60	15%	↓	-1%
SOLAR	60.00	3%	194.00	10%	↑	223%
TOTAL :	1,871.31	100%	2,001.81	100%	↑	7%

FUENTE: UNIDAD DE TRANSACCIONES

Figura 1-10 Capacidad instalada. Unidad de Transacciones (2019)

RECURSO	2018	2019	% VARIACIÓN	% PARTICIPACIÓN
HIDROELÉCTRICO	1,543.69	1,442.47	-7%	22.25%
GEOTÉRMICO	1,437.25	1,372.72	-4%	21.17%
FÓSIL	1,179.60	1,606.09	36%	24.77%
BIOMASA	488.70	551.59	13%	8.51%
SOLAR	129.25	216.81	68%	3.34%
DISTRIBUCIÓN	1.18	1.15	-3%	0.02%
INYECCIÓN NACIONAL	4,779.67	5,190.84	9%	80.07%
IMPORTACIONES NETAS	1,759.26	1,292.05	-27%	19.93%
TOTAL	6,538.93	6,482.89	-0.86%	100.00%

FUENTE: UNIDAD DE TRANSACCIONES Y GENERADORES

Figura 1-11 Inyección por tipo de recurso. Unidad de Transacciones (2019)

Los valores de radiación solar son la principal magnitud que se debe de tener en cuenta para un diseño óptimo de producción; tener un mapa actualizado con los valores de este recurso representa una gran importancia, tomando en cuenta el incremento que la energía solar está teniendo en los últimos años.

2-CAPÍTULO II: ESTACIONES DE MONITOREO DE IRRADIANCIA GLOBAL.

Para el buen desarrollo de la industria solar en aplicaciones térmicas y/o fotovoltaicas en el país, se requiere entre otros, información actualizada del recurso solar, siendo la irradiancia una magnitud de principal interés, la construcción e instalación de estaciones de monitoreo de irradiancia global de bajo costo permitirán un registro continuo de dicha magnitud.

Parte de nuestro trabajo consiste en la construcción de una estación de monitoreo de Irradiancia Solar, a partir de un piranómetro de segunda clase tipo LP02-C; en ese sentido se desarrolló en principio, el diseño de una estación de monitoreo de irradiancia de bajo costo basado en una placa ARDUINO, sin embargo su implementación presentó varios inconvenientes, entre ellos, estabilidad, pérdida de información, problemas de almacenamiento, amplificación de señal analógica; finalmente se construyeron 3 sistemas de monitoreo de irradiancia, que se instalaron en tres diferentes facultades de la universidad de El Salvador siendo estas: la Facultad Multidisciplinaria Occidental, la Facultad Multidisciplinaria Oriental y la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

2.1- ANTECEDENTES DEL PROYECTO.

Anteriormente se ha realizado la construcción de estaciones de monitoreo de irradiancia de bajo costo, usando Arduino como base fundamental del diseño para el procesamiento de los datos y presentación de los resultados obtenidos.

2.1.1- DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES.

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN: PIRANÓMETRO.

El piranómetro es un instrumento meteorológico utilizado para medir de manera muy precisa la radiación solar incidente sobre una superficie. Se trata de un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar (kilovatios por metro cuadrado) en un campo de 180 grados.

A continuación, en la Figura 2-1 se muestra un piranómetro Second Class, este es el tipo de piranómetros utilizado en este proyecto.



Figura 2-1 Piranómetro Second Class

En este tipo de piranómetros el principio de funcionamiento es la funcionalidad lleno-inactiva, utilizando un detector de termopila. La radiación incide sobre un campo visual de 180 grados, la termopila genera un voltaje pequeño de la salida correspondiente con su flujo, realizando una lectura de voltaje en sus terminales y posteriormente dividiendo este valor entre la constante de sensibilidad se conocen los datos de radiación solar en ese instante.

AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN DE PRECISIÓN AD625.

En los terminales del piranómetro se encuentran señales no superiores a los milivoltios, por tanto, para poder acoplarlas con los niveles de operación admisibles por el Arduino, estas señales deben de pasar por una etapa de amplificación.

El amplificador de instrumentación de precisión AD625, se ajusta perfectamente a las necesidades del proyecto destacando a continuación las principales características:

- Ganancia de 1 a 10000.
- Error de ganancia 0.05% y menos de 5ppm/°C de ganancia TC.
- Temperatura de operación 0°C a +70°C.
- Típicamente $V_s = \pm 15\text{ V}$, $R_I = 2\text{ k}\Omega$ y $T_a = +25^\circ\text{C}$
- Ganancia = $(2 \cdot R_F / R_G) + 1$
- $V_{out\ max} \pm 10\text{ V}$



Figura 2-2 Amplificador de Instrumentación AD625

ARDUINO ATMEGA 2560.

El Arduino utilizado para este diseño ha sido el Arduino mega 2560 cuya placa está basada en el microcontrolador ATmega2560. Como características más destacables diremos que tiene 54 pines de entradas/salidas digitales (de los cuales 15 pueden ser usados como salidas PWM), 16 entradas analógicas y 4 receptores/transmisores serie TTL-UART. Consta de una memoria Flash de 256 Kilobytes (de los cuales 8 están reservados para el bootloader), una memoria SRAM de 8 KB y una EEPROM de 4 KB. Su voltaje de trabajo es igual al del modelo UNO: 5V.

Su alimentación puede realizarse a través de la conexión USB o con una fuente de alimentación externa. La fuente de alimentación se selecciona automáticamente. Potencial (no USB) externo puede venir con un adaptador de CA a CC o la batería. El adaptador se puede conectar a un enchufe de 2.1mm centro-positivo en el conector de alimentación de la placa. Los cables desde una batería se pueden insertar en los cabezales de pin GND y Vin del conector de alimentación.

Algunas consideraciones adicionales a tener en cuenta es que el tablero puede funcionar con un suministro externo de 6 a 20 voltios. Si se suministra con menos de 7V, sin embargo, el pin de 5V puede suministrar menos de cinco voltios y la junta puede ser inestable. Si se utiliza más de 12 V, el regulador de voltaje se puede sobrecalentar y dañar la placa. El rango recomendado es de 7 a 12 voltios.

A continuación, se muestra una imagen de un Arduino usado en este proyecto.

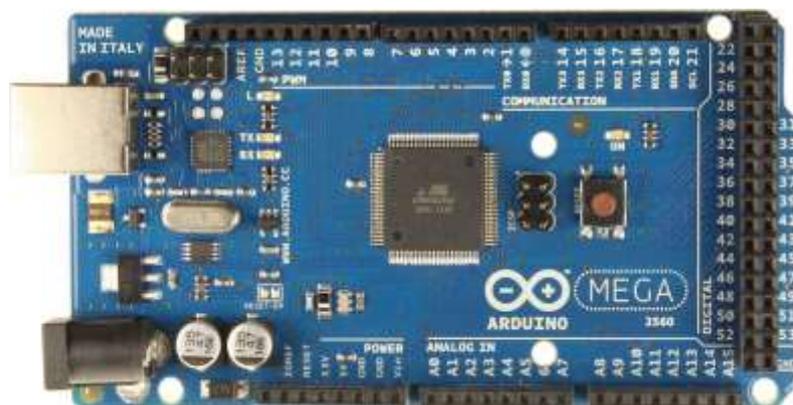


Figura 2-3 Arduino ATMega2560

ARDUINO SHIELD ETHERNET.

El Arduino ethernet shield nos da la capacidad de conectar un Arduino a una red ethernet. Es la parte física que implementa la pila de protocolos TCP/IP.

Está basada en el chip ethernet Wiznet W5100. El Wiznet W5100 provee de una pila de red IP capaz de soportar TCP y UDP. Soporta hasta cuatro conexiones de sockets simultáneas. Usa la librería Ethernet para leer y escribir los flujos de datos que pasan por el puerto ethernet.

El shield provee un conector ethernet estándar RJ45. La ethernet shield dispone de unos conectores que permiten conectar a su vez otras placas encima y apilarlas sobre la placa Arduino.

Arduino usa los pines digitales 10, 11, 12, y 13 (SPI) para comunicarse con el W5100 en la ethernet shield. Estos pines no pueden ser usados para e/s genéricas.

El botón de reset en la shield reinicia ambos, el W5100 y la placa Arduino.

La shield contiene varios Leds para información:

- ON: indica que la placa y la shield están alimentadas
- LINK: indica la presencia de un enlace de red y parpadea cuando la shield envía o recibe datos
- 100M: indica la presencia de una conexión de red de 100 Mb/s (de forma opuesta a una de 10Mb/s)
- RX: parpadea cuando el shield recibe datos
- TX: parpadea cuando el shield envía datos

El propio chip W5100 incluye el manejo de tarjetas SD.

Para usar la Ethernet Shield solo hay que montarla sobre la placa Arduino. Para cargar los sketches a la placa con el shield, conectarla al ordenador mediante el cable USB como se hace normalmente. Luego conectar la Ethernet a un ordenador, a un switch o a un router utilizando un cable ethernet standard (CAT5 o CAT6 con

conectores RJ45). La conexión al ordenador puede requerir el uso de un cable cruzado (aunque muchos ordenadores actuales, pueden hacer el cruce de forma interna).

Puntos para recordar del Ethernet Shield:

- Opera a 5V suministrados desde la placa de Arduino
- El controlador ethernet es el W5100 con 16K de buffer interno. No consume memoria.
- El shield se comunica con el microcontrolador por el bus SPI, por lo tanto, para usarlo siempre debemos incluir la librería SPI.h.
- Soporta hasta 4 conexiones simultáneas
- Usar la librería Ethernet para manejar el shield.
- El shield dispone de un lector de tarjetas micro-SD que puede ser usado para guardar ficheros y servirlos sobre la red. Para ello es necesaria la librería SD.
- Al trabajar con la SD, el pin 4 es usado como SS.
- Arduino se comunica con W5100 y la tarjeta SD usando el bus SPI a través del conector ICSP. Por este motivo los pines 50, 51, 52 y 53 no podrán usarse. Los pines 10 y 4 se usan para seleccionar el W5100 y la tarjeta SD.
- El Ethernet y el SD no pueden trabajar simultáneamente y debemos tener cuidado al usar ambos de forma conjunta.



Figura 2-4 Arduino ATmega2560 más Shield Ethernet

el Arduino por tanto es necesario una etapa previa cuya función será elevar los niveles de tensión lo suficiente para que el Arduino pueda fácilmente procesarlos.

Para establecer la ganancia de la etapa amplificadora, se consideró que el Arduino trabaja con un nivel de entrada nominal de hasta 5V y la constante de calibración del piranómetro, tomando en cuenta un piranómetro cuya constante es de $13\mu\text{V}$ por Watts/m^2 y un valor de $1500 \text{ Watts}/\text{m}^2$ el voltaje de salida del piranómetro será de:

$$V_{\text{piranómetro}} = 1500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 13\mu\text{V} = 19.5 \text{ mV} \quad \text{Ec. 2.1.1}$$

Para el diseño inicial se tomó la decisión de no trabajar con datos límites en los rangos admisibles del Arduino por lo cual se usó como voltaje máximo de salida del amplificador de 4V, por lo tanto, la ganancia necesaria es de:

$$G = \frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{piranómetro}}} = \frac{4 \text{ V}}{19.5 \text{ mV}} = 205.19 \frac{\text{V}}{\text{V}} \quad \text{Ec. 2.1.2}$$

Nota: En la sección 2.2.3 MODIFICACIÓN DE LA ETAPA AMPLIFICADORA, se presentan correcciones al comportamiento de la ganancia vista en esta sección.

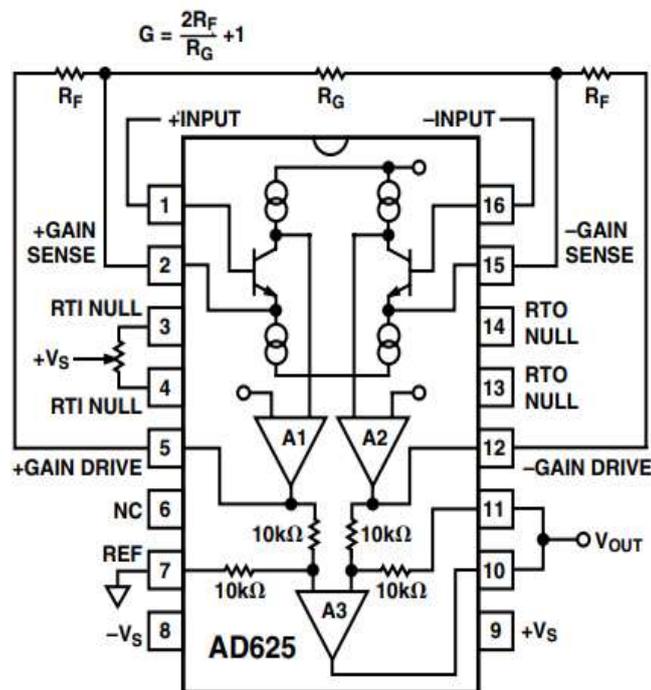


Figura 2-6 Configuración en modo ganancia fija del AD625. Analog Devices, Inc. 2000

Tomando la ecuación de la ganancia para el AD625 e igualando con el valor encontrado anteriormente se encuentran los valores de las resistencias.

$$G = \frac{2RF}{Rg} + 1 = 205.19 \quad \text{Ec. 2.1.3}$$

Seleccionando valores comerciales 220Ω para RG, por simplicidad estableciendo una ganancia de 200 y despejando para RF se encuentra que el valor de dichas resistencias será de 22kΩ, a continuación, se muestra la configuración final de la etapa amplificadora.

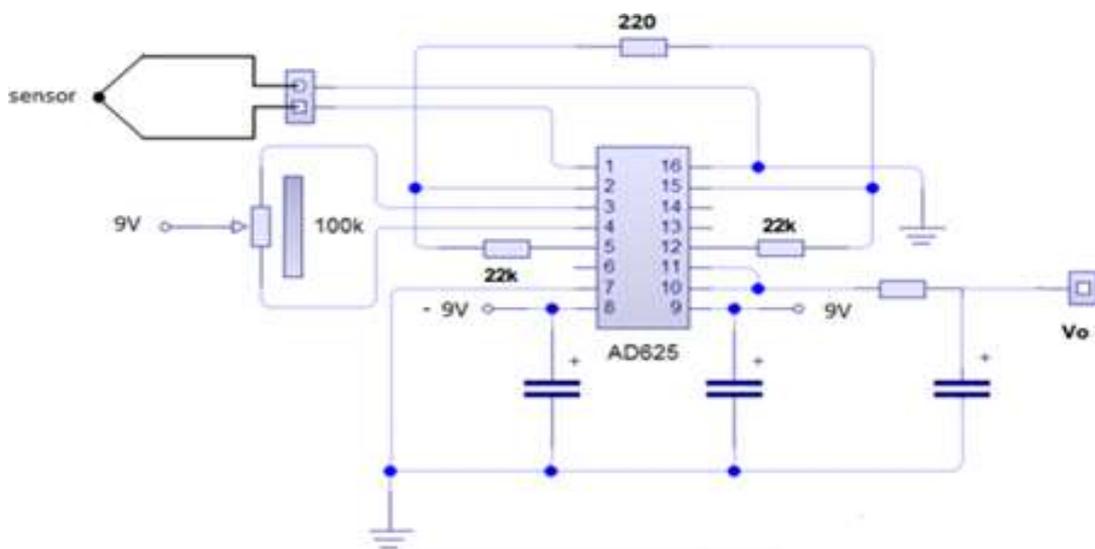


Figura 2-7 Esquema de construcción para la etapa de amplificación

Para comprobar el óptimo desempeño del circuito se realizaron pruebas con el piranómetro, ya que los valores de las resistencias tienen un porcentaje de error que se suma al error de la ganancia. Con esto se buscaba obtener y verificar que la ganancia de dicho amplificador sea lineal para diferentes niveles de irradiancia.

En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos de dicha medición.

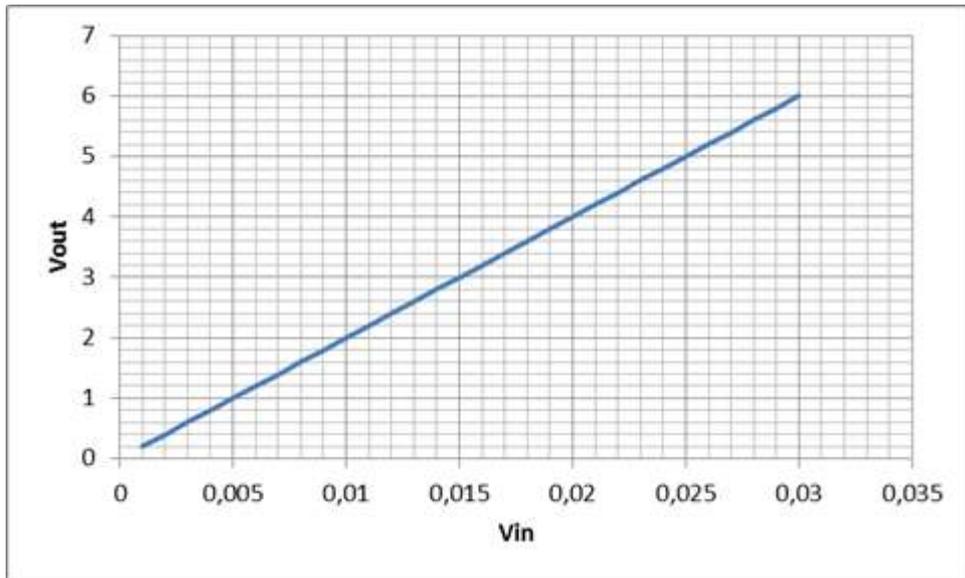


Figura 2-8 Curva de la ganancia lineal del amplificador AD625

Los resultados finales de los medidores de irradiancia construidos en este proyecto se muestran a continuación en las imágenes.

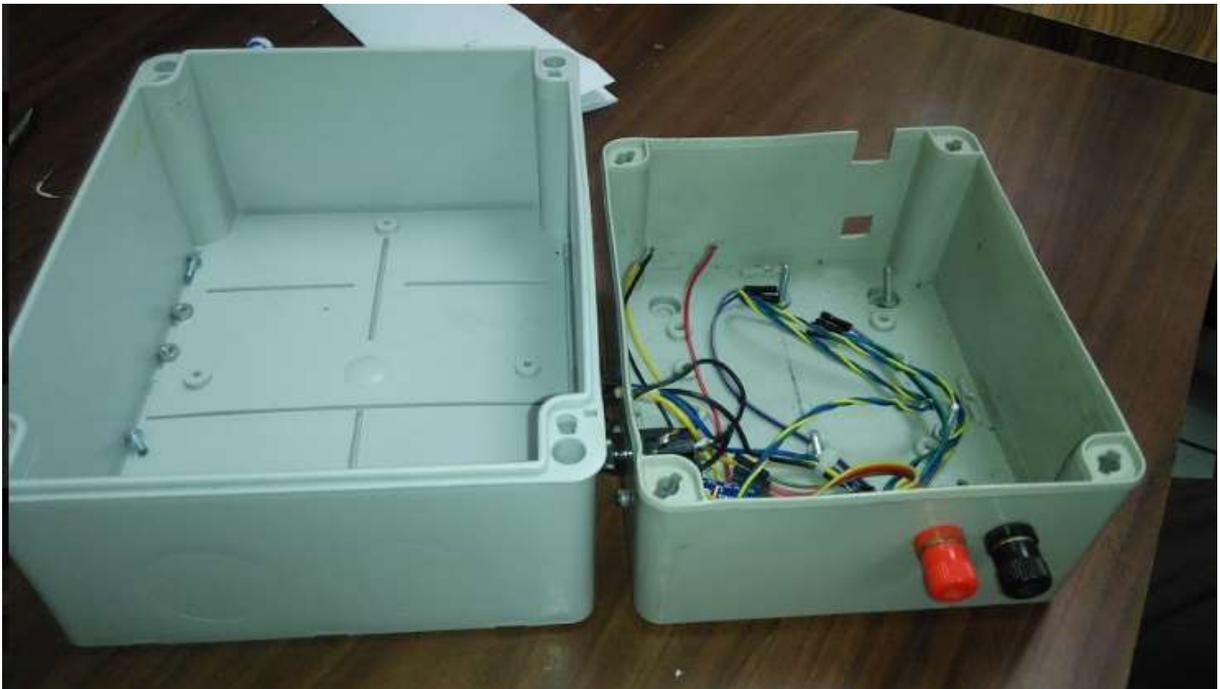


Figura 2-9 Proceso de construcción de los medidores.

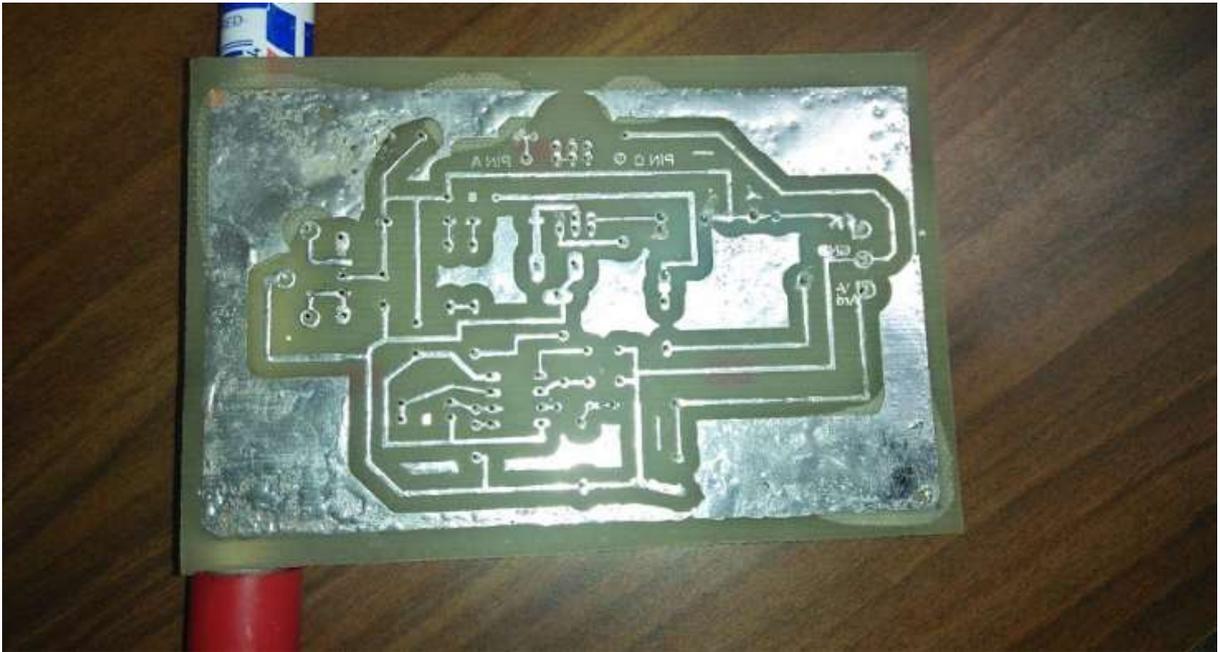


Figura 2-10 Placa para la implementación del circuito de los medidores



Figura 2-11 Presentación final de los medidores



Figura 2-12 Medidores contruidos finalmente

INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS.

Aparte de la construcción física de cada uno de los medidores también se implementó un código para la recolección e interpretación de cada uno de los datos obtenidos por la parte física de los medidores.

La lógica básica de este código consiste en realizar una lectura del A0 al cual está conectada la señal del piranómetro amplificada, tomar lecturas cada dos minutos convertirlas de voltaje digital de 0 a 1023 a valores correlativos de irradiancia y almacenar dicha información en la microSD incorporada en la Shield Ethernet; el código en sí, no se presentará en esta sección.

2.1.3- ALCANCES Y LIMITACIONES.

El medidor presentado y construido en esta sección realiza las siguientes tareas:

- Toma datos cada dos minutos y realiza promedios durante horas.
- Tiene la capacidad de almacenar esta información en una memoria externa.

Sin embargo, con la puesta en marcha de este proyecto se observó que existen diferentes inconvenientes.

- Cuando hay cortes en el suministro de energía eléctrica, el Arduino pierde la hora con la cual se asocia cada medición que se toma, esto afecta el recuento que se realiza y distorsiona los valores promedio.
- Existen valores que no se procesan correctamente en la etapa de amplificación, con lo cual el Arduino no es capaz de leer estos datos. Cuando se presenta este inconveniente la lectura queda básicamente en valor de cero y esto afecta considerablemente el valor promedio.
- Además de esto se tomó en consideración el hecho de que el Arduino está expuesto a recibir valores que exceden los 5v y esto sobrecalienta el equipo y genera que el medidor se apague o deje de tomar mediciones.

2.2- DISEÑO DE MEDIDORES USANDO ARDUINO.

Debido a las limitaciones antes expuestas sobre el diseño preliminar de los medidores, se realizaron modificaciones pensadas, para resolver los inconvenientes presentados y tener un mejor desempeño en la toma de mediciones y presentación de los datos. A continuación, se enlistan y describen las modificaciones realizadas.

2.2.1- DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES INCORPORADOS.

RELOJ EXTERNO “MODULO RTC”.

La hora dentro de un programa se puede usar a través de dos formas: la primera, con software, a través de la librería Time.h, de esta forma se trabajó en el primer prototipo el principal inconveniente es que cuando se reinicia el Arduino la hora se reinicia también al valor seteado antes de cargarle el programa al Arduino, para solucionar esto usamos la segunda forma de obtener la hora y es a través de una RTC, un módulo RTC es un Reloj de Tiempo Real, estos son hardware disponibles en el mercado; en nuestro proyecto usamos de dos tipos el DS1307 y el DS3231.



Figura 2-13 Real Time Clock DS3231. PotentialLabs. (2001)

El Real-Time-Clock Serie, es un dispositivo de bajo consumo de energía, completo con código binario decimal (BCD), reloj/calendario más 56 bytes de NV SRAM. Dirección y datos son transferidos a través de 2 hilos serie, bus bidireccional. El reloj/calendario provee información de, segundos, minutos, horas, día, fecha, mes y año. El final de fecha de mes se ajusta automáticamente durante meses menores de 31 días, incluyendo correcciones para el año bisiesto. El reloj funciona en cualquiera formato de 24 horas o en 12 horas con indicador AM/PM. Tiene

incorporado un circuito de sensor de tensión que detecta fallas de energía y cambia automáticamente al suministro de batería de respaldo.

Incorporan una batería CR2032 para mantener el dispositivo en hora al retirar la alimentación. Esta batería debería ser capaz de mantener alimentado durante meses al DS. La tensión de alimentación de batería es de 2.3 a 5.0.

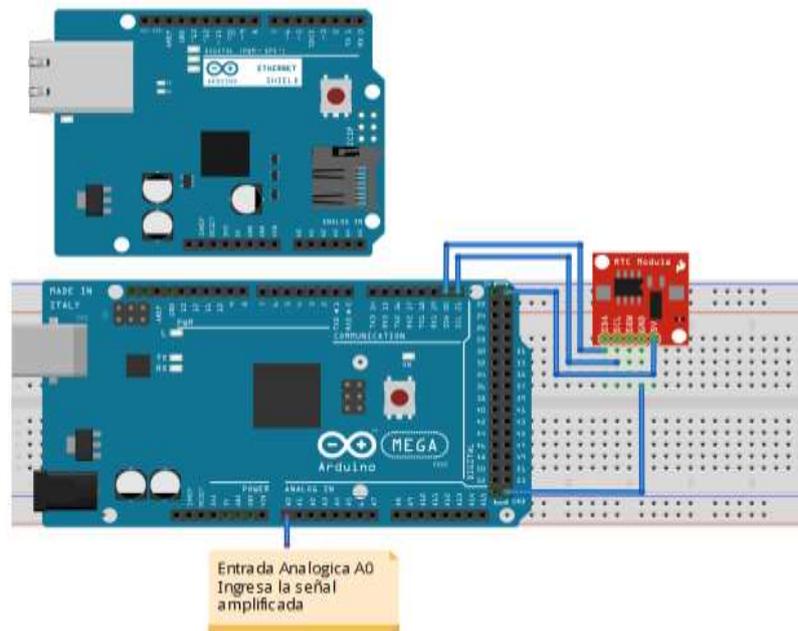


Figura 2-14 Esquema de conexión del RTC al Arduino.

REGULADOR DE VOLTAJE L7805CT.

El L7805CT es un regulador que puede aceptar un voltaje de entrada de 36 voltios, sin embargo, se recomienda limitar el voltaje a 2-3 voltios más alto que el voltaje regulado de salida. Para un regulador de 5 voltios, no se debe aplicar más de 8 voltios como tensión de entrada. La diferencia entre la tensión de entrada y de salida aparece como calor. Cuanto mayor sea la diferencia entre el voltaje de entrada y de salida, más calor se generará. Si se genera demasiado calor, a través del alto voltaje de entrada, el regulador puede recalentarse. Si el regulador no tiene un disipador de calor para disipar este calor, puede ser destruido y funcionar mal. Así que las dos opciones son, que el voltaje de entrada que en el regulador se limite a 2-3 voltios por encima de la tensión de salida regulada o colocar un disipador de calor en el circuito para disipar el calor creado. De igual manera, para nuestro diseño se ha incluido la colocación de un disipador puesto que los valores pueden

oscilar de acuerdo con los valores de irradiancia medidos y no se puede garantizar que en algún momento no se excederán los niveles de tensión sugeridos.

La forma física y el principio de funcionamiento se muestran en la Figura 2-15 y la Figura 2-16 respectivamente.



Figura 2-15 Regulador de voltaje L7805CT.

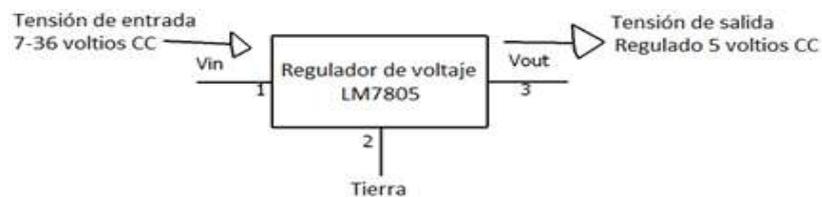


Figura 2-16 Funcionamiento del regulador de voltaje L7805CT.

Con la implementación de los componentes antes descritos se ha logrado lo siguiente:

- Estabilidad en el sistema
- Reducir las variaciones de voltaje en la alimentación.
- Reducir el calentamiento de la placa.

2.2.2- MODIFICACIÓN DE LA ETAPA DE AMPLIFICACIÓN.

Con la evolución del proyecto se vio la necesidad de realizar modificaciones en la etapa de amplificación en los medidores iniciales, esto debido a los grandes errores presente en los datos medidos, con el fin de obtener una calibración más exacta y con base en las pruebas realizadas en el laboratorio se llegó a las siguientes conclusiones y modificaciones.

REFERENCIA DE VOLTAJE ANALÓGICO.

En Arduino es necesario configurar el voltaje de referencia utilizado para la entrada analógica (es decir, el valor utilizado como la parte superior del rango de entrada), en la etapa amplificadora del diseño preliminar se consideró que el voltaje de referencia era 5v por tanto la ganancia se calculó en base a ello, pero la placa con la que se cuenta realmente es de 3.3v por tanto la referencia para dicha placa debe de ser 3.3v.

Los niveles de voltaje de referencia para las placas AVR Arduino (Uno, Mega, Leonardo, etc.) son los que se muestran a continuación:

- Predeterminado: la referencia analógica predeterminada de 5 voltios (en placas Arduino de 5V) o 3,3 voltios (en placas Arduino de 3,3V).
- Interno: una referencia incorporada, igual a 1.1 voltios en el ATmega168 o ATmega328P y 2.56 voltios en el ATmega32U4 y ATmega8 (no disponible en el Arduino Mega).
- Internal1v1: una referencia incorporada de 1.1V (solo Arduino Mega).
- Internal2v56: una referencia incorporada de 2.56V (solo Arduino Mega).
- Externo: el voltaje aplicado al pin AREF (solo de 0 a 5 V) se utiliza como referencia.

MODIFICACIÓN DE LA GANANCIA.

En nuestro caso al no usar el pin AREF y contar con una placa de 3.3v, la ganancia debe de calcularse nuevamente.

$$G = \frac{V_{salida}}{V_{piranómetro}} = \frac{3.3 V}{19.5 mV} = 169.23 \frac{V}{V} \quad Ec. 2.2.1$$

A partir de esta ganancia se modificaron entonces las resistencias. Tomando en cuenta que para RF siempre se utilizara una resistencia de 22kΩ, se calcula RG a partir de:

$$G = \frac{2RF}{Rg} + 1 = 169.23 \quad \text{Ec. 2.2.2}$$

Obteniendo un valor teórico para RG de 260Ω, pero utilizando una resistencia de 330Ω para fines prácticos, con lo cual la nueva ganancia real medida es de 142.95V/V.

COMPORTAMIENTO REAL DE LA GANANCIA.

Mediante pruebas realizadas a cada medidor, se observó que la ganancia no presentaba un comportamiento constante y lineal como se planteó en la sección 2.1.2 ETAPA AMPLIFICADORA. Además cada uno de los medidores tenía un comportamiento distinto en cuanto a la ganancia, por tanto, en el código para la interpretación de los datos no se podía considerar la ganancia como la misma para para los tres medidores en estudio, así que se tomaron mediciones y ecuaciones para determinar el comportamiento de éstos en operación, los resultados se muestran a continuación.

Nota: Para fines prácticos nombraremos los tres medidores de la siguiente forma: Medidor 1 o M1, Medidor 2 o M2 y Medidor 3 o M3.

Para observar el comportamiento real de la ganancia, en el laboratorio se conectaron las terminales de un piranómetro al canal de un DataLogger y se conectó la señal de salida del sistema amplificador a otro canal se realizó un barrido desde 0.000mV hasta 25mV usando un foco como fuente de excitación para el piranómetro como lo muestran las Figura 2-17, Figura 2-18, Figura 2-19 y con estos resultados se encontró la ganancia V_{out}/V_{in} , posteriormente se graficó Ganancia vs V_{in} .



Figura 2-17 Pruebas de laboratorio. 1. Camara de prueba de iluminacion. 2. Piranometro Second Class.



Figura 2-18 Pruebas de laboratorio. 1. DataLogger encargado de leer el voltaje del piranometro. 2. Camara de Prueba cerrada.



Figura 2-19 Pruebas de laboratorio

Con el gráfico de Ganancia vs V_{in} se observó el comportamiento real que tenía cada uno de los medidores las curvas Azules mostradas en las Figura 2-20, Figura

2-21 y Figura 2-22, para lograr una interpretación más exacta de los resultados con el Arduino, se trató de introducir este comportamiento en el código, usando el software de Excel se graficó la curva que mejor representaba los datos, se extrajo la ecuación para dicha curva y entre otras consideraciones como dividir los datos y usar dos ecuaciones distintas para interpretarlos se obtuvieron los resultados (Curvas Rojas) mostrados en las siguientes Figuras.

GANANCIA PARA EL MEDIDOR 1.

Para datos mayores a 15mV se ha tomado una ganancia fija de 142 V/V.

Para datos menores a 15mV la ganancia está descrita por la siguiente ecuación:

$$G = 80.336 * Vin^{-0.135} \frac{V}{V} \quad Ec. 2.2.3$$

El resultado es la curva Roja del siguiente gráfico.

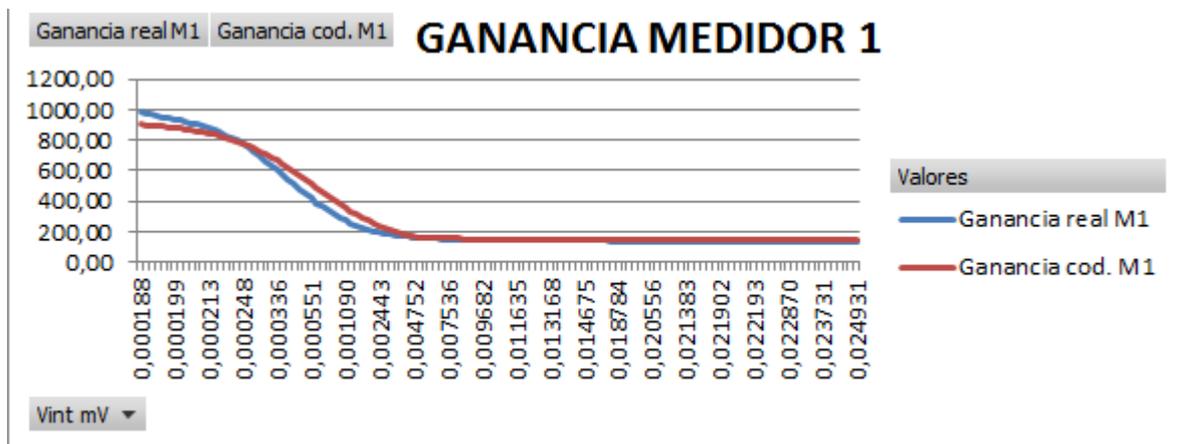


Figura 2-20 Comportamiento de la ganancia para el medidor 1

GANANCIA PARA EL MEDIDOR 2.

Para valores mayor a 15mV se ha tomado una ganancia fija de 144 V/V.

Para los valores menores a 15mV la ganancia está descrita por la siguiente ecuación:

$$G = 8 * Vin^{-0.68} \frac{V}{V} \quad Ec. 2.2.4$$

El resultado se muestra con la curva Roja en el siguiente gráfico.

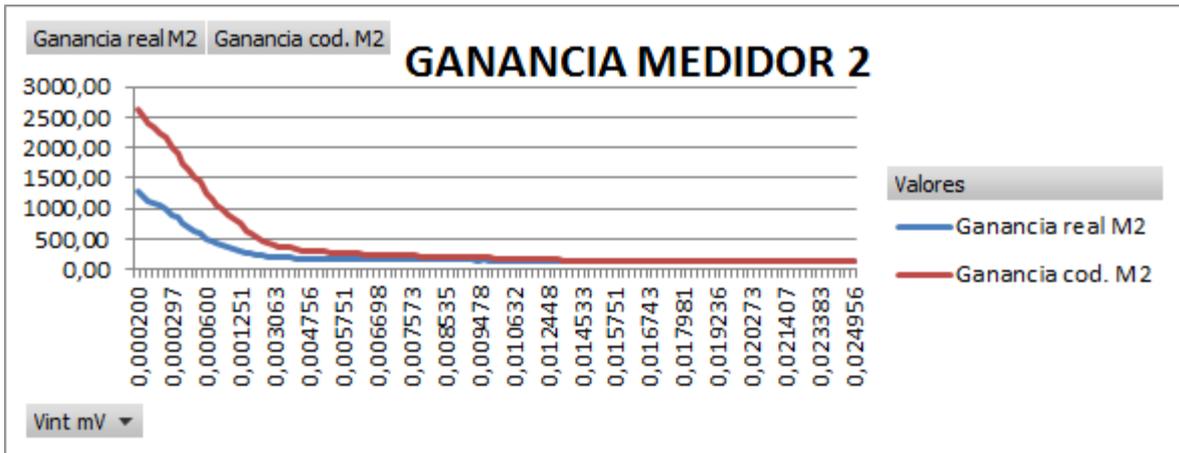


Figura 2-21 Comportamiento de la ganancia para el medidor 2

GANANCIA PARA EL MEDIDOR 3.

Para datos mayores a los 15mV la ganancia ha tomado un valor fijo de 136 V/V.

Para valores menores a los 15mV y mayores que 10mV la ganancia es descrita por la siguiente ecuación:

$$G = 5.4442 * Vin^{-0.681} \frac{V}{V} \quad Ec. 2.2.5$$

Para valores menores a los 10mV la ganancia está descrita por:

$$G = 80.01 * Vin^{-0.133} \frac{V}{V} \quad Ec. 2.2.6$$

Los resultados se muestran en la curva Roja de la Figura-2.2.10

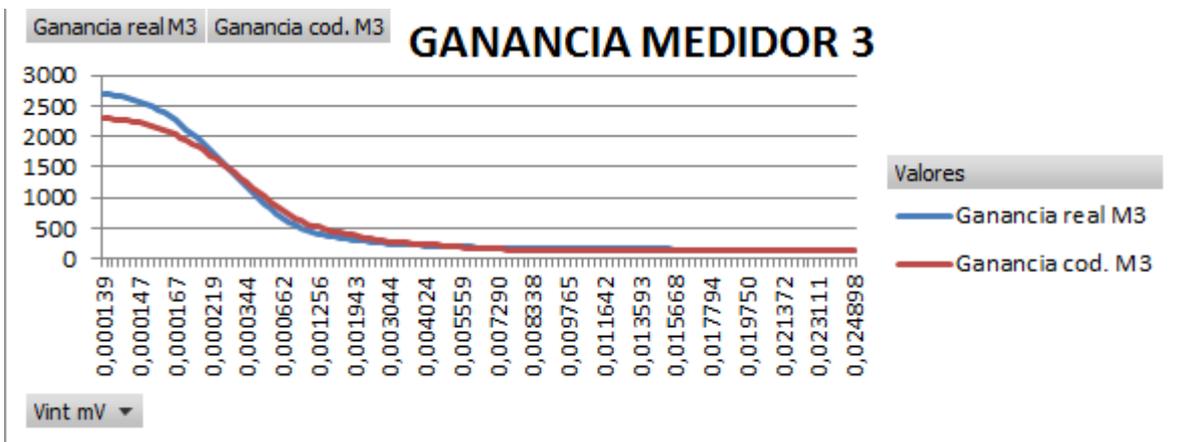


Figura 2-22 Comportamiento de la ganancia para el medidor 3

COEFICIENTE R DE PEARSON.

Con el fin de comprobar qué ecuación representa mejor los datos reales se usó el coeficiente de correlación producto o momento r de Pearson, un índice adimensional acotado entre -1,0 y 1,0, ambos incluidos, que refleja el grado de dependencia lineal entre dos conjuntos de datos, mientras más cercano a 1,0 sea este factor los datos son más dependientes.

La fórmula para el coeficiente de correlación producto o momento r de Pearson es la siguiente:

$$r = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad \text{Ec. 2.2.7}$$

Donde x e y son las medias de muestra PROMEDIO (matriz1) y PROMEDIO (matriz2).

De la Figura 2-20, Figura 2-21 y Figura 2-22 se calculó el factor r y los resultados se muestran a continuación.

Tabla 2-1 Comparación del coeficiente de Pearson para los tres medidores

VALORES	MEDIDOR 1	MEDIDOR 2	MEDIDOR 3
R^2	98,41%	98,42%	98,92%
PROMEDIO GANANCIA REAL	310,77	241,17	616,28
PROMEDIO GANANCIA COD.	320,69	420,86	585,82

2.2.3- RESULTADOS OBTENIDOS.

El código generado y cargado al Arduino para obtener estos resultados, se muestra en el Anexo A.

PRIMER MEDIDOR (M1).

El medidor M1 se instaló en la sede central de la Universidad de El Salvador, en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, sobre el techo de la Escuela de Ingeniería Eléctrica (Ver Imágenes de instalación en Anexo B). A continuación, se muestran algunos de los resultados obtenidos por el medidor en dicha ubicación.



Figura 2-23 Radiación solar del día 09/11/2019 datos minuto a minuto

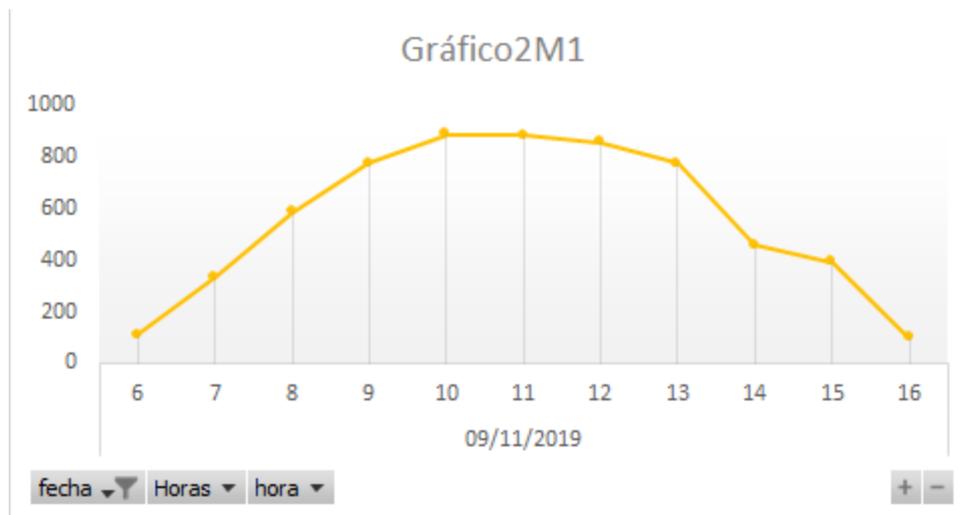


Figura 2-24 Radiación solar del día 09/11/2019 promedios cada hora



Figura 2-25 Radiación solar del día 10/11/2019 datos minuto a minuto

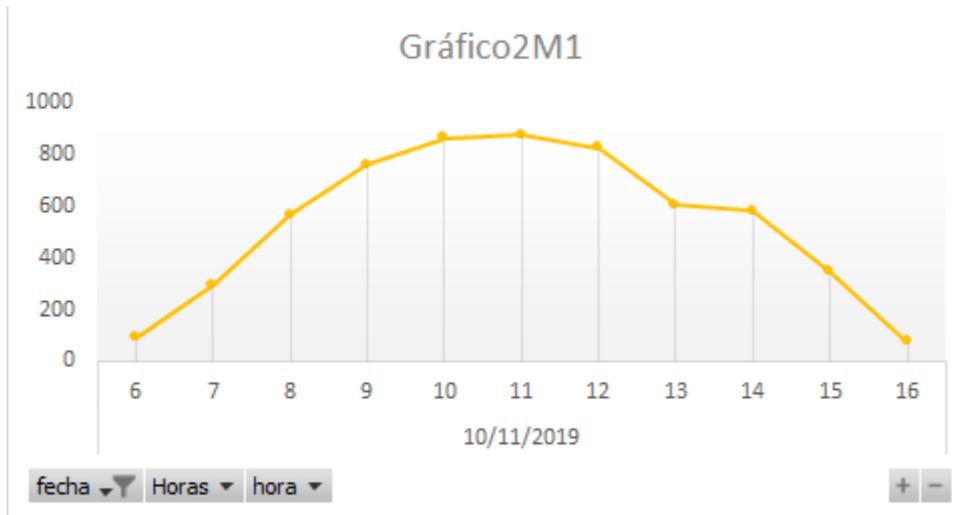


Figura 2-26 Radiación solar del día 10/11/2019 promedios cada hora



Figura 2-27 Radiación solar del día 11/11/2019 datos minuto a minuto

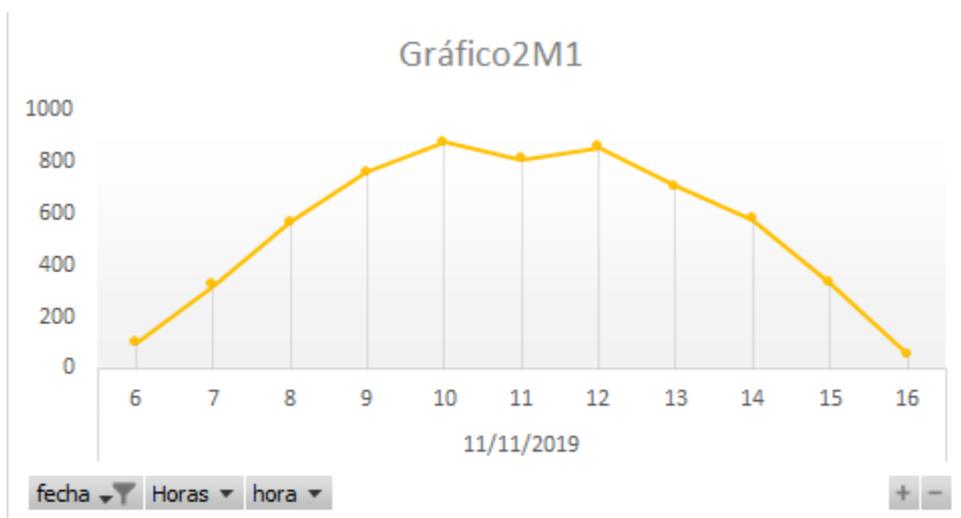


Figura 2-28 Radiación solar del día 11/11/2019 promedios cada hora

SEGUNDO MEDIDOR (M2).

El medidor M2 se instaló en la facultad multidisciplinaria occidental de la Universidad de El Salvador (Ver Imágenes de instalación en Anexo B). A continuación, se muestran algunos de los resultados obtenidos por el medidor en dicha ubicación.

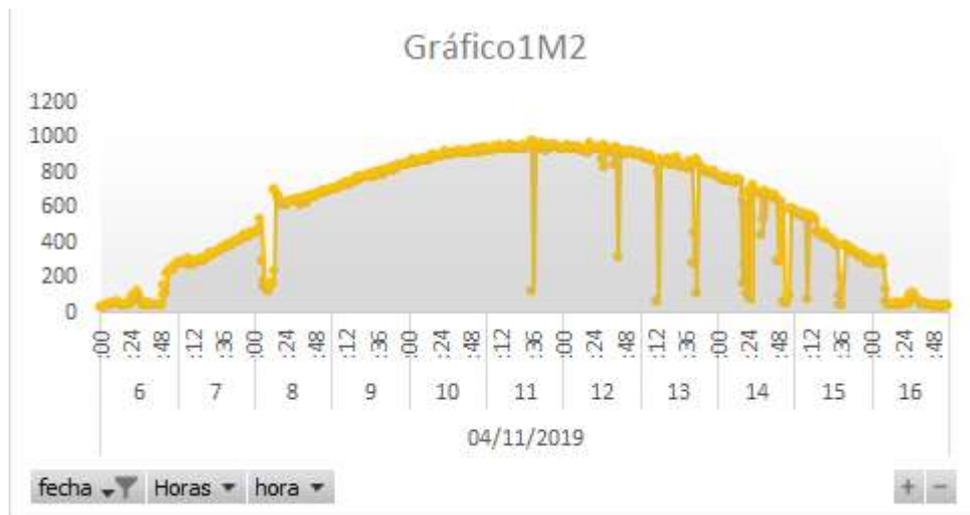


Figura 2-29 Radiación solar del día 04/11/2019 datos minuto a minuto

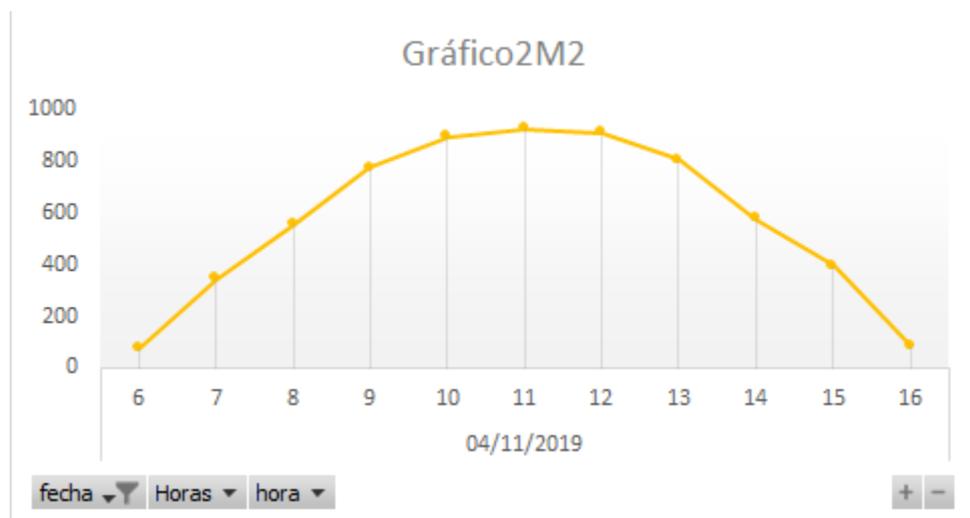


Figura 2-30 Radiación solar del día 04/11/2019 promedios cada hora

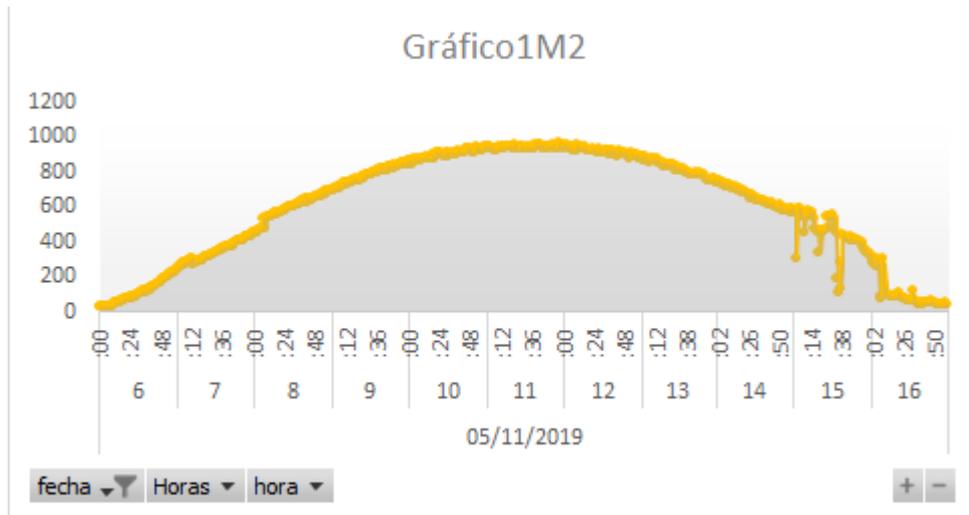


Figura 2-31 Radiación solar del día 05/11/2019 datos minuto a minuto

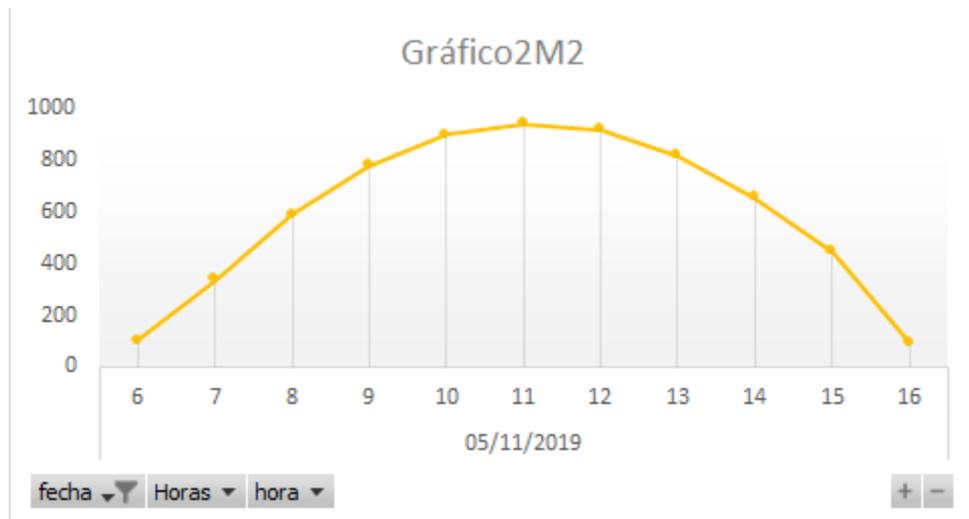


Figura 2-32 Radiación solar del día 05/11/2019 promedios cada hora

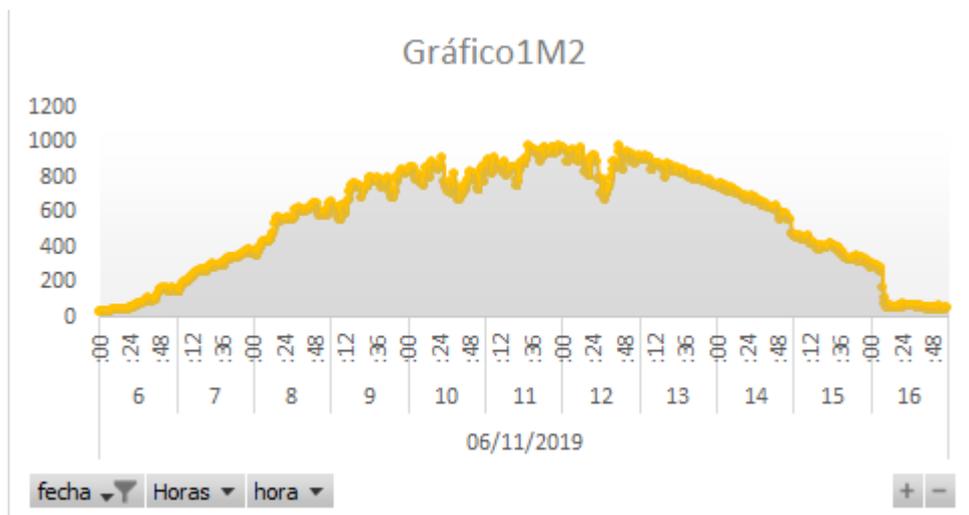


Figura 2-33 Radiación solar del día 06/11/2019 datos minuto a minuto

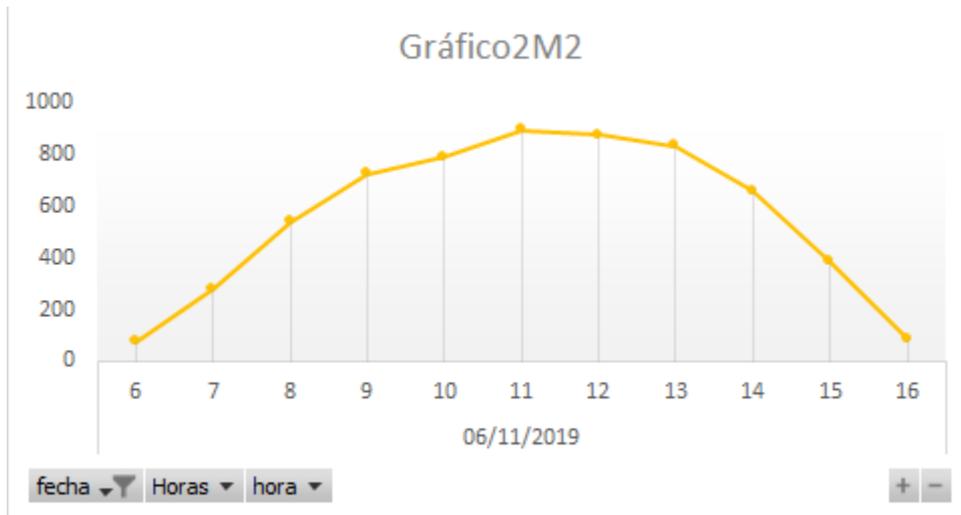


Figura 2-34 Radiación solar del día 06/11/2019 promedios cada hora

TERCER MEDIDOR (M3).

El medidor M3 se instaló en la facultad multidisciplinaria oriental de la Universidad de El Salvador (Ver imágenes de instalación en Anexo B). A continuación, se muestran algunos de los resultados obtenidos por el medidor en dicha ubicación.

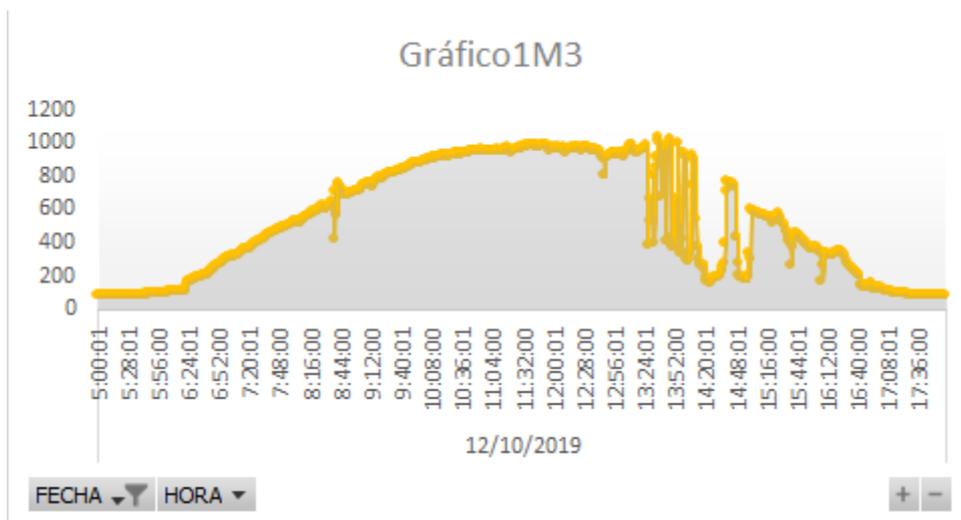


Figura 2-35 Radiación solar del día 12/10/2019 datos minuto a minuto



Figura 2-36 Radiación solar del día 12/10/2019 promedios cada hora

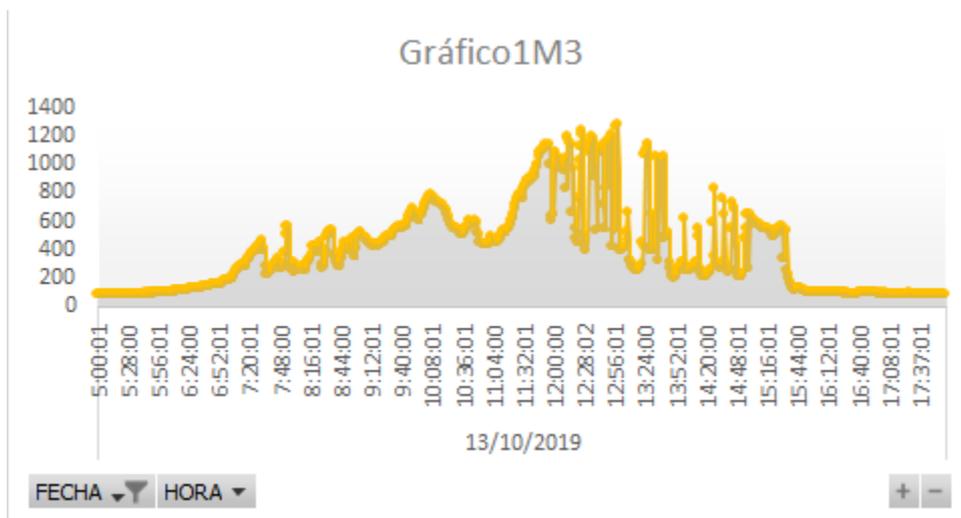


Figura 2-37 Radiación solar del día 13/10/2019 datos minuto a minuto



Figura 2-38 Radiación solar del día 13/10/2019 promedios cada hora

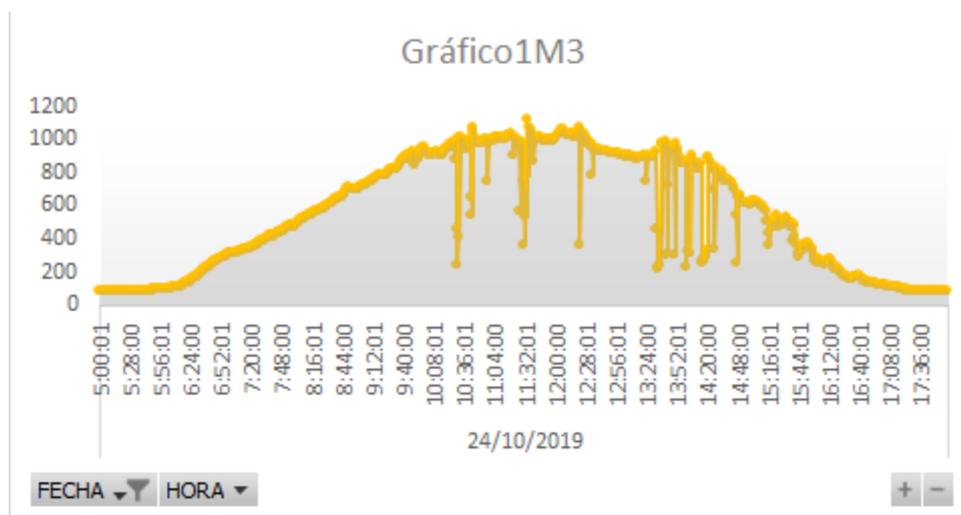


Figura 2-39 Radiación solar del día 24/10/2019 datos minuto a minuto



Figura 2-40 Radiación solar del día 24/10/2019 promedios cada hora

Con base a la instalación de los tres medidores que se construyeron e instalaron, se logró obtener información recopilada durante un año (2020) de medición. Los datos en bruto pueden consultarse en el archivo “Datos de medidores” (anexo con este documento). En el Anexo B2 pueden apreciarse los valores de radiación promedio por hora para cada uno de las tres estaciones de monitoreo instaladas.

A partir de los datos obtenidos por las estaciones de monitoreo de irradiancia usando Arduino, se elaboró una tabla con los valores de energía promedio diaria para cada mes, por cada una de las estaciones, Tabla 2-2.

Tabla 2-2 Valores de energía promedio diaria, generada con los medidores instalados.

MESES	SANTA ANA	SAN MIGUEL	UES
ENERO	5650.80	5450.23	5873.25
FEBRERO	5711.00	5911.40	5819.29
MARZO	6575.71	5738.99	6564.05
ABRIL	4990.20	5285.23	5502.39
MAYO	3567.40	4758.78	5244.85
JUNIO	4434.74	4220.68	4408.82
JULIO	4378.20	5450.41	5197.75
AGOSTO	4579.36	4334.53	4554.03
SEPTIEMBRE	3980.60	5067.95	5286.97
OCTUBRE	4928.32	5517.91	4931.75
NOVIEMBRE	4515.83	4290.98	4137.42
DICIEMBRE	4879.79	5048.26	4575.50

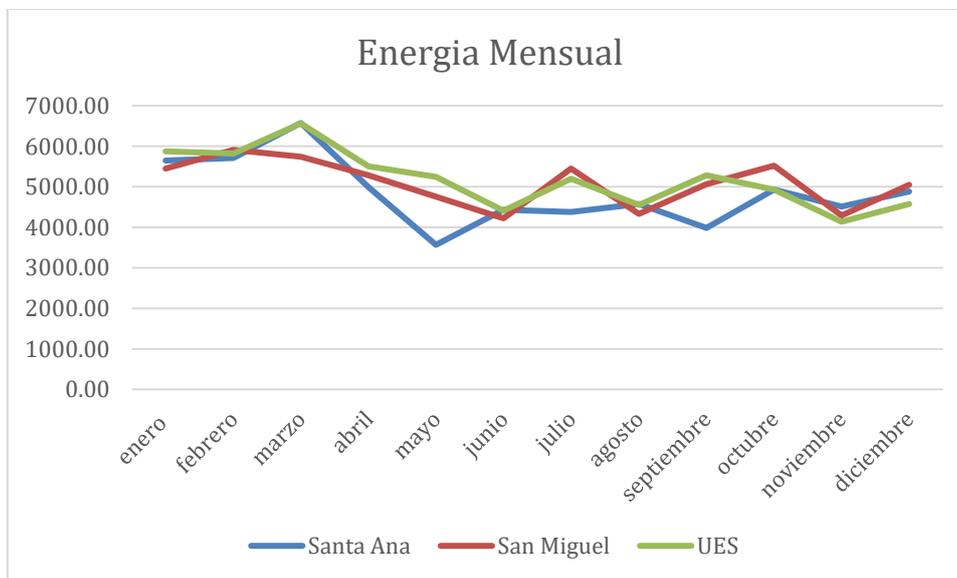


Figura 2-41 Grafica con valores de energía de la Tabla 2-2.

Se puede observar que a pesar que los medidores se encontraran en sitios diferentes, parecen obtener un porcentaje alto de similitud cuando a energía diaria se refiere

2.3- DISEÑO DE MEDIDORES USANDO RASPBERRY.

Luego de una evaluación de la operación y limitaciones de las estaciones de monitoreo de irradiancia usando ARDUINO, se determinó que estas podrían superarse empleando un dispositivo RASBERRY, lo que permitió mejorar notablemente el procesamiento de la señal de irradiancia solar.

2.3.1- COMPONENTES PARA MEDIDOR BASADO EN RASPBERRY

El dispositivo raspberry es un ordenador de placa reducida, que potencia el uso de software más complejos debido a su capacidad de procesamiento. Para este proyecto se utiliza una placa raspberry modelo 3 B+; que cuenta con un procesador Broadcom BCM2837B0 a 1.4 GHz, una tarjeta de red con Wi-Fi a doble banda, 4 puertos USB, salida de video HDMI.



Figura 2-42 Raspberry Pi Modelo 3 B+.

Con este tipo de placa se pretende obtener mejores resultados por su capacidad de procesamiento, a diferencia de la placa Arduino, la Raspberry no posee entradas analógicas, por lo tanto, es necesario un módulo que sea capaz de interpretar la

lectura del piranómetro de manera tal que pueda ser leída por la Raspberry. El módulo que se utilizara para dar lectura al piranómetro y posteriormente sea procesada por la Raspberry está basado en el microchip MCP3424.

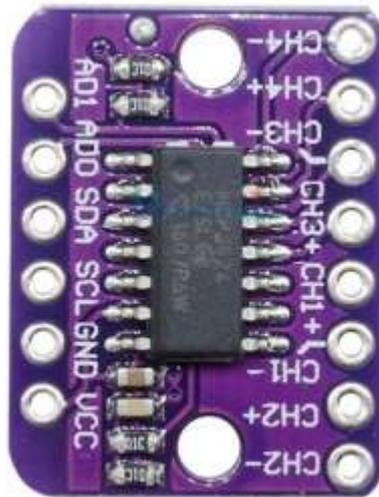


Figura 2-43 Módulo A/D basado en chip MCP3424.

El módulo ADC (Analogic Digital Converter) posee la facilidad de comunicarse con la Raspberry por medio de la comunicación I2C, esto permite que se pueda hacer una mejor interpretación en el análisis de datos por medio de un código; a diferencia de la etapa amplificadora que se utilizaba en el modelo anterior basado en Arduino, este modelo implementado con Raspberry no necesita dicha etapa amplificadora, debido a que el módulo posee una ganancia programable, la cual nos permite que la Raspberry calcule con mayor precisión la irradiancia en base a la diferencia de tensión que genera el sensor piranómetro.

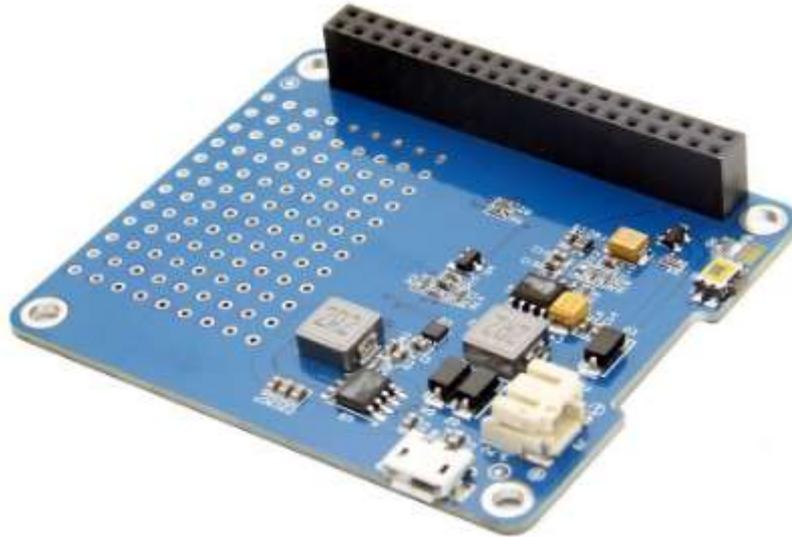


Figura 2-44 Modulo UPS para Raspberry.

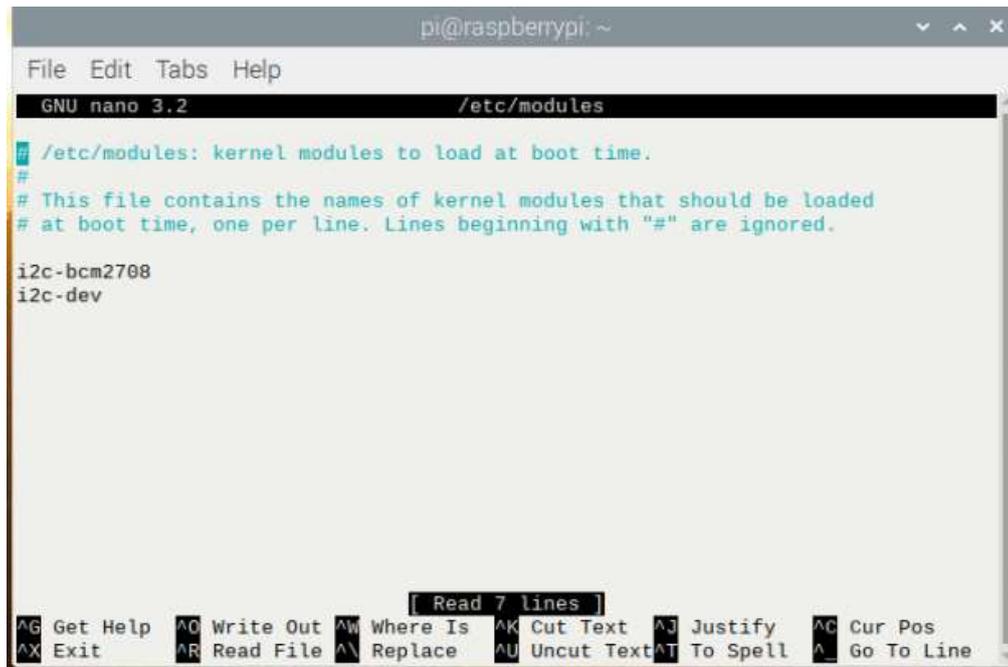
En el nuevo modelo, se implementó de una mejor manera con un respaldo de energía, para prevenir pérdida de datos al momento de suspensión de suministro de energía. El nuevo modelo cuenta con un módulo UPS que será el encargado de proveer de energía al medidor cuando este pierda el suministro de energía convencional; dicho modulo posee una batería de 1500 mAh, la cual mediante pruebas se determinó que puede suministrar energía al medidor por un periodo de 3 horas continuas.

2.3.2- CONFIGURACIÓN DE RASPBERRY

Se instaló el sistema operativo Raspbian que ayuda a controlar de una forma sencilla la programación de la Raspberry, al momento de realizar esta configuración el sistema operativo más reciente fue la versión 4.19 y esa se instaló en la Raspberry utilizada. Seguido de instalar Raspbian, se configuro el puerto I2C para la comunicación con el módulo ADC, para ello se digito en consola el siguiente comando:

```
$sudo nano /etc/modules
```

Esto abre el editor de texto, donde se debió escribir lo siguiente:



```
pi@raspberrypi: ~
File Edit Tabs Help
GNU nano 3.2 /etc/modules

# /etc/modules: kernel modules to load at boot time.
#
# This file contains the names of kernel modules that should be loaded
# at boot time, one per line. Lines beginning with "#" are ignored.

i2c-bcm2708
i2c-dev

Read 7 lines |
^G Get Help ^O Write Out ^W Where Is ^K Cut Text ^J Justify ^C Cur Pos
^X Exit ^R Read File ^\ Replace ^U Uncut Text ^T To Spell ^_ Go To Line
```

Figura 2-45 Archivo de texto editado y configurado.

Una vez guardado el archivo de texto. Se necesitó instalar las herramientas necesarias para el puerto I2C, para ello digitamos lo siguiente:

1. `$sudo apt-get install i2c-tools`
2. `$sudo apt-get install python-smbus`
3. `$sudo raspi-config`

Terminando el proceso de instalación, fue necesario activar el puerto I2C con el siguiente comando:

```
$ sudo i2cdetect -y 1
```

```
pi@raspberrypi: ~  
File Edit Tabs Help  
pi@raspberrypi:~$ sudo i2cdetect -y 1  
  0  1  2  3  4  5  6  7  8  9  a  b  c  d  e  f  
00:  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  
10:  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  
20:  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  
30:  -  -  -  -  -  -  36  -  -  -  -  -  -  -  -  -  
40:  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  
50:  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  
60:  -  -  -  -  -  -  -  -  68  -  -  -  -  -  -  -  
70:  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  -  
pi@raspberrypi:~$
```

Figura 2-46 Archivo de texto editado y configurado.

Una vez digitado el comando comprobamos que el puerto I2C está habilitado y ha leído correctamente la dirección del módulo ADC.

2.3.3- INSTALACIÓN Y CONFIGURACIÓN DE LAMP

LAMP es el acrónimo utilizado para describir una serie de herramientas utilizados para formar una infraestructura. Las herramientas descritas en el acrónimo son: Linux, Apache, MySQL/MariaDB, y PHP. Estas herramientas fueron necesarias para instalar un servidor que es el encargado de almacenar y presentar los datos recolectados por el medidor.

Como primer paso se instaló el servidor Apache, por lo que fue necesario crear y dar permisos al grupo de usuarios que usa apache. En la consola de Raspbian se digitaron las siguientes líneas:

1. `$sudo groupadd www-data`
2. `$sudo usermod -a -G www-data www-data`
3. `$sudo apt install apache2`

Una vez finalizado el proceso, mediante una ventana de cualquier navegador digitando la dirección ip de la Raspberry se pudo visualizar la página por defecto que presenta el servidor Apache.



Figura 2-47 Pagina por defecto de Apache, consultada desde un navegador.

Una vez instalado Apache, se instaló PHP y sus diferentes librerías y herramientas que son necesarias para una correcta utilización, desde una consola se digitaron las siguientes líneas:

```
$sudo apt-get install php7.0 php7.0-curl php7.0-gd php7.0-imap php7.0-json  
php7.0-mcrypt php7.0-mysql php7.0-opcache php7.0-xmlrpc libapache2-mod-  
php7.0
```

Una vez finalizó la descarga y la instalación de las herramientas, el siguiente paso fue instalar MySQL (Para Linux MariaDB, es el equivalente a MySQL) que es el encargado de crear una base de datos y administrar las lecturas que el medidor capture, junto con MySQL se instaló phpMyAdmin, que es el encargado de proporcionar al usuario una interfaz gráfica para manipular de manera más sencilla MySQL. Desde consola se digitaron las siguientes líneas:

```
$sudo apt-get install mariadb-server mariadb-client  
$sudo service apache2 restart  
$sudo mysql_secure_installation
```

2.4- PROPUESTA FINAL.

Una vez finalizada la programación y configuración se procedió a instalar cada uno de los componentes sobre una caja plástica. Para la entrada de la señal del piranómetro se colocaron 2 conectores que facilitarían la conexión y proporcionan la opción de cambio del sensor en caso existiera alguna especie de daño.



Figura 2-48 Estación de monitoreo: Modelo MLA20.v1

Las mejoras finalmente obtenidas en relación a ARDUINO se presentan en la siguiente tabla comparativa.

Tabla 2-3 Comparación entre Arduino y Raspberry PI

Descripción	Arduino	Raspberry pi
Tamaño de la placa	10.15 x 5.33 cm	8.6 x 5.4 cm
Memoria	0.002MB	512MB
Velocidad de reloj	16 MHz	700 MHz
On Board Network	Ninguna	10/100 wired Ethernet RJ45
Multitarea	No	Si
Voltaje de entrada	5 V	7 a 12 V
Memoria Flash	32KB	Tarjeta SD (2 a 16G)
Puerto USB	Uno	Dos
Sistema operativo	Ninguno	Distribuciones de Linux
Entorno de Desarrollo Integrado (IDE)	Arduino	Scratch, IDLE, cualquiera con soporte Linux
Porcentaje de confiabilidad	Reinicio de la placa arduino durante corte o suministro de energía lo que puede provocar perdida de datos o creación de datos aleatorios	Más estabilidad al momento de un corte de suministro de energía mayor capacidad de almacenamiento de datos en backup
Estabilidad en etapa amplificadora	Baja, los porcentajes de error presentados son demasiado altos con respecto a los datos obtenidos.	Mayor porcentaje de fiabilidad en los datos obtenidos ya que el procesamiento digital de la señal es mucho más rápido.
Conexión a internet	No tiene la capacidad de mantener un servidor para almacenar datos	Almacena los datos en un servidor, siendo posible consultarlos de forma remota en tiempo real
Frecuencia de toma de datos	Guarda en memoria datos cada minuto y los almacena en un txt.	Registra los datos cada 15 minutos, para reducir la complejidad en el filtrado de datos

2.5- RESULTADOS.

Para el medidor final se concluyó que la toma de datos sería en intervalos de 15 minutos, ya que en intervalos más cortos el filtrado de datos presentaba aumentaba su complejidad, porque hasta la nubosidad más liviana y pasajera alteraba la forma de la curva, es por eso que se decidió por aumentar los intervalos de toma de datos de manera que no afectara la investigación sin perder la calidad de la misma. También se tomó como referencia que las estaciones meteorológicas de LaGeo y de la Escuela de Ingeniería Eléctrica sus intervalos de medición es precisamente 15 minutos.

A continuación, algunos resultados los días de medición que se obtuvieron con el medidor basado en RaspberryPi.



Figura 2-49 Radiación solar del día 01/01/2020



Figura 2-50 Radiación solar del día 04/05/2020



Figura 2-51 Radiación solar del día 10/11/2020

3-CAPÍTULO III: TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS DATOS.

Este capítulo presenta una breve descripción de términos estadísticos, estos, serán aplicados a los datos obtenidos con el fin de tener una serie de datos que represente con un mayor criterio la información.

Posteriormente se presentarán los datos obtenidos en estudios anteriores y los datos obtenidos del período 2009-2018 luego de realizar distintos tratamientos, descritos y detallados en las siguientes secciones, para finalmente mostrar la tabla con la que se realizará el mapa de irradiancia de El Salvador en el siguiente capítulo.

3.1- DEFINICIONES.

GEOESTADÍSTICA:

Es una rama de la matemática y de la Estadística aplicada, que se encarga del estudio de datos geográficos (relacionados entre sí), los cuales se obtienen de los cambios espaciales o temporales que ocurren en la superficie terrestre con la intención de analizar fenómenos y/o predecir el valor de una variable. Se aplican métodos de cálculo geoespaciales para obtener probabilidades precisas.

GEOPROCESAMIENTO:

El geoprocesamiento es la ejecución metódica de una secuencia de operaciones en los datos geográficos para crear nueva información. Los dos propósitos fundamentales que persigue son ayudar a realizar el modelado y el análisis, y automatizar las tareas SIG (Sistema de Información Geográfica).

INTERPOLACIÓN:

En el subcampo matemático del análisis numérico, se denomina interpolación a la obtención de nuevos puntos partiendo del conocimiento de un conjunto discreto de puntos. En ingeniería y algunas ciencias es frecuente disponer de un cierto número de puntos obtenidos por muestreo o a partir de un experimento y pretender construir una función que los ajuste.

VARIOGRAFÍA:

Variograma Teórico: Es una herramienta que permite analizar el comportamiento espacial de una propiedad o variable sobre una zona dada.

SEMIVARIOGRAMA:

El semivariograma experimental tiene múltiples utilidades, pero generalmente su uso se limita a ser el paso previo para realizar una interpolación espacial de las muestras mediante krigeado y poder así predecir los valores de la variable en los lugares no muestreados.

3.2- ESTACIONES METEOROLÓGICAS DE EL SALVADOR.

El Servicio Nacional de Estudios Territoriales y El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, en su sitio web, tiene a la disposición el Sistema de Referencia Territorial donde presenta el mapa de El Salvador con la ubicación geográfica de cada una de las estaciones meteorológicas. Figura 3-1.

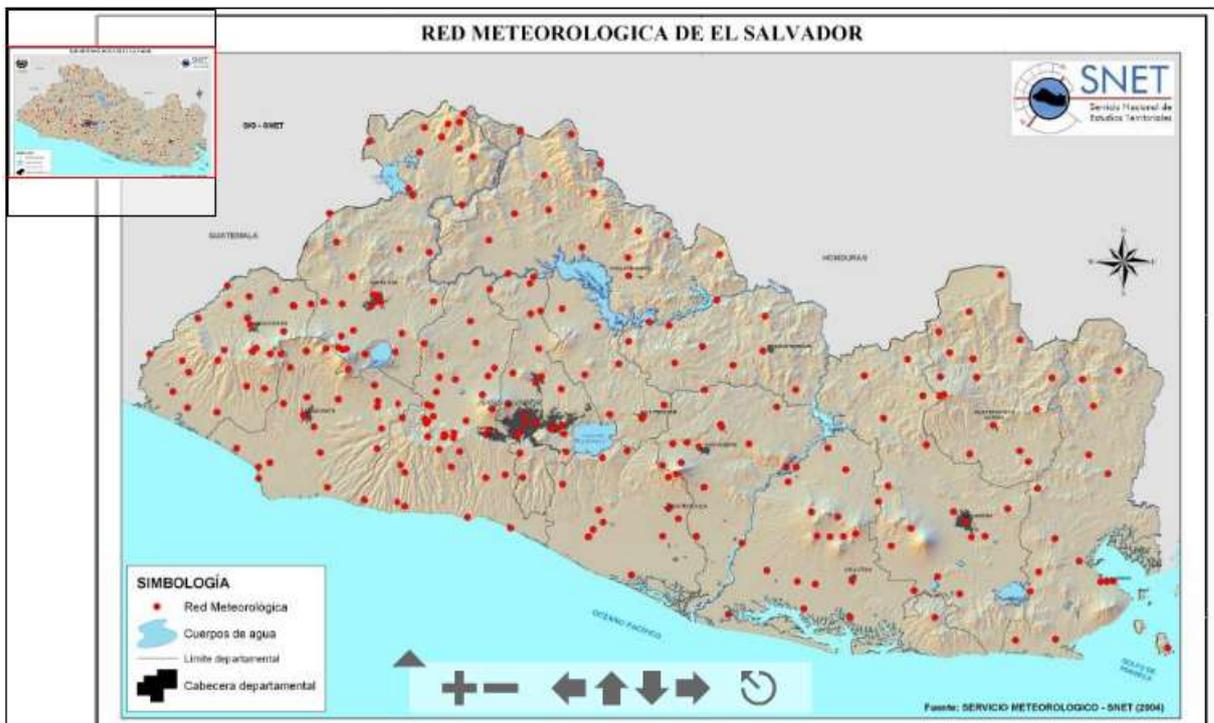


Figura 3-1 Red Meteorológica de El Salvador (SNET).

En el Anexo C se presentan todas las estaciones dentro del territorio salvadoreño, mostrando, además cada una de las variables que dichas estaciones registran, pero, de todas estas, las estaciones de interés son aquellas que registran los parámetros de: [HR]: Luz Solar (Hrs), [RI] : Radiación Solar Instantánea (Wh/m^2) o [SR]: Radiación Solar (Wh/m^2) ya que estos datos son los que tienen la información necesaria para generar el mapa de irradiancia de El Salvador, a continuación en la Tabla 3-1 se presentan las estaciones que cuentan con esta información.

Tabla 3-1 Estaciones de interés en la Red Meteorológica de El Salvador.

Nº	EST.	NOMBRE	LAT.	LON.	HR	RI	SR
1	3	Belen Gualcho	14.482	-88.794			x
2	4	Ilopango	13.698	-89.118	x		x
3	31	La Unión	13.333	-87.824	x		x
4	32	San Miguel	13.439	-88.159	x		x
5	33	Santa Ana	13.982	-89.549	x		x
6	35	Boquerón	13.734	-89.267	x		x
7	36	PROCAFE	13.684	-89.287			x
8	37	Acajutla	13.568	-89.833	x		x
9	40	Las Pilas	14.371	-89.096	x	x	x
10	42	El Pacayal	13.469	-88.323	x		x
11	54	Ishuatan	13.643	-89.558	x	x	x
12	60	Providencia	13.474	-89.096		x	x
13	61	UES	13.719	-89.203	x		x
14	64	Guacotecti	13.871	-88.645	x	x	x
15	65	Pto Parada	13.251	-88.439	x	x	x
16	94	La Cañada	13.310	-87.889	x	x	x
17	95	Santa Cruz Portillo	13.439	-88.801	x	x	x
18	96	Perquin	13.961	-88.158	x	x	x
19	116	El Imposible	13.827	-89.947	x	x	
20	117	Puente Cuscatlan	13.599	-88.603	x	x	x
21	118	La Palma	14.278	-89.159	x		x
22	119	Cant. La Frontera	14.119	-89.656	x		x
23	120	Hda Melara	13.80	-89.221			x
24	121	Jucuaran	13.196	-88.291	x	x	x
25	122	Tepetitan	13.626	-88.843	x	x	x
26	123	Concep Quezalte	14.081	-88.968	x		x
27	124	Berlin Met	13.507	-88.506	x		x
28	127	Ciudad Barrios	13.725	-88.273	x	x	x

29	133	Volcan S Miguel2	13.441	-88.272	x		x
30	138	Dulce Nombre Ma	14.200	-89.011	x		x
31	145	AgrC El Penon	13.669	-89.919	x	x	x
32	149	AgrC Chalatenango	14.042	-88.969	x	x	x
33	150	AgrC Zapotitan	13.768	-89.412	x	x	x
34	151	AgrC Chalchuapa	13.986	-89.668	x	x	x
35	152	AgrC Ahuachapan	13.939	-89.856	x	x	x
36	154	AgrC Acahuapa	13.538	-88.581	x	x	x
37	155	AgrC Osicala	13.805	-88.149	x	x	x
38	156	AgrC Cara Sucia	13.775	-90.034	x	x	x
39	265	Apaneca MET	13.848	-89.839			x

La Tabla 3-1 presenta todas las estaciones denominadas de interés ya que estas registran al menos uno de los tres los parámetros relacionados con la radiación solar siendo esta, el principal estudio de esta investigación.

En conjunto con el SNET, de las 39 estaciones mencionadas en la tabla anterior, solamente fue posible obtener los datos de las estaciones mostradas en la Tabla 3-2

Tabla 3-2 Estaciones que registran Luz Solar (H)

ESTACIÓN	NOMBRE	LONGITUD	LATITUD
A-18	LOS ANDES	-89.64°	13.88°
A-31	PLANES DE MONTECRISTO	-89.36°	14.40°
A-37	SANTA ANA UNICAES	-89.55°	13.98°
B-10	CERRÓN GRANDE	-88.91°	13.94°
G-03	NUEVA CONCEPCION	-89.29°	14.12°
H-14	LA HACHADURA	-90.09°	13.85°
L-04	SAN ANDRÉS	89.41°	13.81°
M-24	SAN MIGUEL UES	-88.16°	13.43°
N-02	LA UNIÓN	-87.81°	13.32°
S-10	ILOPANGO	-89.12°	13.69°

La red meteorológica del SNET cuenta con 39 estaciones que registran parámetros relacionados a la radiación solar, pero actualmente tienen fallas en la mayoría de estas, teniendo a la disposición solamente la información de 10 estaciones, a continuación, se muestra la ubicación de estas.



Figura 3-2 Ubicación de las estaciones que cuentan con datos de HR.

Adicional a los datos de las estaciones del SNET, ha sido posible obtener los datos provenientes de otras estaciones las cuales se enlistan a continuación, y se muestra en la Figura 3-3 todas las estaciones que se usarán para actualizar el mapa de radiación solar de El Salvador.

Estaciones adicionales.

- ❖ 1 estación **CH14** corresponde a una plataforma geotérmica ubicada en Chinameca, San Miguel instalada por La GEO. Esta contiene datos únicamente de los años 2017 y 2018.
- ❖ 2 estación **SV1** corresponde a una plataforma geotérmica ubicada en San Vicente instalada por La GEO. Solamente tiene en sus registros los datos del año 2018.



Figura 3-3 Estaciones de estudio para la actualización del mapa de radiación.

El estudio se realizará con 10 estaciones para el periodo 2009-2018 y contaremos con 11 estaciones para el año 2017 y por último para el análisis del año 2018 se utilizarán las 12 estaciones presentes en la figura anterior.

3.3- REGISTROS DE LOS NIVELES DE RADIACIÓN SOLAR PROVENIENTES DE ESTUDIOS ANTERIORES.

Para la actualización del mapa de radiación solar es necesario el registro de niveles de radiación solar, con promedios mensuales y anuales de las diversas estaciones meteorológicas que registran dichos parámetros.

La Tabla 3-3 presenta los datos de radiación solar utilizados en la tesis (Carlos Méndez, Edgard Menjívar, Lester Padilla, 2014), estos datos son los correspondientes a la Tabla 2.5.8 de dicho documento.

Tabla 3-3 Niveles de Radiación solar (períodos 1969-1983, 1984-2004).

Código	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
A-18	4.30	5.10	5.30	4.90	3.80	3.40	4.20	4.20	3.60	3.70	3.90	3.90	4.20
A-31	5.20	5.30	5.20	4.60	3.60	3.50	4.20	4.00	3.70	4.30	5.00	5.10	4.50
A-35	4.40	4.70	4.70	4.40	4.00	3.70	5.10	5.00	3.70	3.70	4.20	4.20	4.30
A-37	5.50	5.70	5.90	5.40	4.60	4.60	5.00	5.00	5.20	5.30	5.50	5.40	5.30
B-10	5.00	5.20	5.30	4.90	4.40	4.20	4.50	4.70	4.60	4.80	4.80	4.80	4.80
G-03	5.50	5.80	5.80	5.40	4.80	4.50	4.80	5.00	5.00	5.20	5.40	5.20	5.20
G-13	4.60	5.00	5.60	5.30	5.10	5.00	5.50	5.50	4.80	4.70	4.30	4.30	5.00
H-08	5.00	5.40	5.70	5.50	5.00	4.70	5.20	5.00	4.30	4.50	4.60	4.50	5.00
H-14	4.70	4.80	5.00	4.60	4.00	3.80	4.00	4.20	4.30	4.50	4.80	4.70	4.90
L-04	5.10	5.30	5.20	4.90	4.30	4.10	4.50	4.60	4.40	4.60	4.90	4.90	4.70
L-08	5.00	5.40	5.70	5.30	4.70	4.40	5.20	5.00	4.40	4.40	4.70	4.70	4.90
M-06	4.50	5.00	5.40	5.40	5.00	4.90	5.20	5.20	4.80	4.60	4.40	4.40	4.90
M-18	4.60	5.10	5.40	5.30	4.90	4.80	5.10	5.00	4.60	4.40	4.40	4.30	4.80
M-23	4.60	5.20	5.40	4.50	3.70	3.70	4.90	4.70	4.00	3.90	4.20	4.00	4.40
M-24	4.80	5.00	5.10	4.80	4.30	4.10	4.30	4.70	4.80	4.70	4.70	4.60	4.70
N-02	5.20	5.50	5.50	5.30	4.80	4.50	4.80	5.10	5.10	5.00	5.20	5.10	5.10
N-15	4.70	5.10	5.40	5.30	4.80	5.00	5.20	5.20	4.80	4.70	4.50	4.40	4.90
S-05	4.90	5.40	5.70	5.40	4.90	5.10	5.50	5.20	4.60	4.80	4.80	4.80	5.10
S-10	6.00	6.30	6.30	5.60	4.90	4.60	5.20	5.20	5.30	5.70	6.10	6.00	5.60
S-27	5.10	5.60	6.20	5.90	5.20	5.30	5.90	5.60	4.90	4.80	5.00	4.80	5.40
T-06	4.90	5.30	5.60	5.50	5.10	4.90	5.30	5.20	4.80	4.70	4.70	4.60	5.10

U-06	5.00	5.60	5.80	5.40	4.60	4.20	5.20	5.10	4.10	4.20	4.60	4.80	4.90
U-11	4.90	5.40	5.50	5.20	4.80	4.80	5.40	5.40	5.00	4.80	4.80	4.70	5.10
V-06	4.80	5.30	5.60	5.50	5.10	4.90	5.30	5.30	4.80	4.70	4.60	4.60	5.00
V-13	4.60	5.20	5.30	5.10	4.80	4.70	5.10	5.10	4.60	4.50	4.60	4.40	4.80
Z-02	5.00	5.30	5.30	4.90	4.30	4.20	4.50	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70
Z-04	4.40	4.90	5.10	4.80	4.10	4.00	4.50	4.30	3.50	3.70	3.70	3.90	4.20

El número de años que conforman los datos de la Tabla 3-3 combinan los registros correspondientes al periodo 1969 a 1983 (Mauricio Ayala, Ismael Sánchez, Arturo Escalante, Willian Marroquín, octubre 2005) mientras que la Tabla 3-4 registra un periodo de 9 años (2005 al 2013).

Tabla 3-4 Niveles de Radiación Solar (período 2005-2013).

Estación	Códi.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anu.
Finca Los Andes	A-18	4.35	5.08	5.33	4.9	3.81	3.39	4.16	4.18	3.63	3.71	3.89	3.86	4.18
Los Pla. Montecristo	A-31	5.2	5.3	5.17	4.6	3.59	3.51	4.17	4.01	3.71	4.26	5.03	5.06	4.45
UNICAES	A-37	5.54	5.74	5.89	5.4	4.62	4.56	4.99	5.04	5.17	5.29	5.54	5.42	5.27
Cerrón Grande	B-10	4.96	5.18	5.28	4.93	4.38	4.21	4.51	4.68	4.59	4.8	4.82	4.83	4.75
Nueva Concepción	G-03	5.51	5.83	5.81	5.43	4.85	4.53	4.85	4.99	4.98	5.2	5.37	5.25	5.21
La Hachadura	H-14	4.7	4.85	4.97	4.61	4.01	3.83	4.04	4.21	4.3	4.5	4.81	4.72	4.89
San Andrés	L-04	5.06	5.27	5.25	4.88	4.33	4.08	4.5	4.59	4.41	4.63	4.91	4.9	4.73
UES	M-24	4.76	5	5.13	4.82	4.27	4.14	4.35	4.72	4.77	4.74	4.74	4.57	4.66
CORSAIN	N-O2	5.2	5.54	5.53	5.25	4.77	4.49	4.79	5.12	5.14	5	5.17	5.09	5.12
Aeropuerto	S-10	6.01	6.26	6.28	5.65	4.88	4.57	5.17	5.23	5.31	5.74	6.09	5.95	5.6
S Francisco Gotera	Z-02	5.01	5.33	5.3	4.9	4.34	4.18	4.5	4.68	4.65	4.65	4.7	4.73	4.73
Est. CEL		5.49	5.49	6.51	5.49	5.13	5.1	5.88	5.51	4.92	5.25	5.53	5.36	5.48
Est. Secundaria		5.63	5.96	6.86	6.09	5.87	5.7	6.27	6.03	5.65	5.46	5.8	5.12	5.87
Est. La Ceibita		2.78	3.05	3.22	3	2.27	2.11	2.46	2.5	2.37	2.46	2.71	2.49	2.67
Est. Esquipulas		2.8	2.63	2.99	2.89	2.33	2.01	2.23	2.44	2.3	2.07	1.86	1.63	2.33

3.4- 4 ADQUISICIÓN Y GENERACIÓN DE DATOS (PERÍODO 2009-2018.)

La toma de datos puede realizarse de dos formas: manual y automatizada, las estaciones meteorológicas son sistemas de adquisición de datos automatizados lo cual tiene ventajas como: una frecuencia para la toma de datos por tanto una mayor capacidad de registros y esto a su vez significa un número de parámetros más elevados, evidentemente también cuenta con desventajas y es que no existe un control sobre la toma de datos, así como un retardo en la detección de problemas, estas condiciones se ven reflejadas a continuación.

3.4.1- DATOS OBTENIDOS DE LAS ESTACIONES

El período de estudio para este proyecto es de 2009-2018, por tanto, las estaciones meteorológicas proporcionaron los datos de horas de sol para el caso de las estaciones del SNET y radiación solar en el caso de las estaciones de la GEO.

Al tratarse de sistemas de adquisición de datos automatizados algunas estaciones presentaron fallas y no registraron datos para ciertos días, en el caso de las estaciones del SNET algunas de ellas presentaron problemas todo un año en el cual no registraron datos.

a continuación, se presentarán 5 estaciones con los datos proporcionados.

ESTACIÓN A-18: LOS ANDES

La estación A-18 ubicada en las coordenadas Lon: -89.64° y Lat: 13.88° como muestra la Figura 3-4.

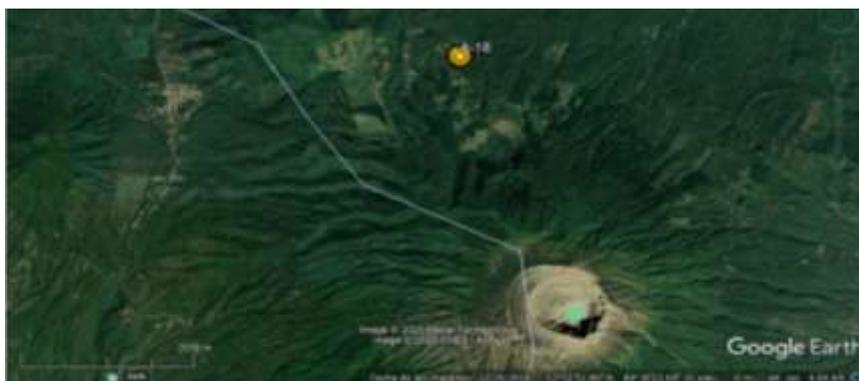


Figura 3-4 Estación A-18 Los Andes. Ubicada en Finca Los Andes, Departamento de Santa Ana, municipio de Santa Ana.

La estación A-18 cuenta con un registro de horas sol [H] desde el 01/ene/2009 hasta el 31/dic/2018, la estación registra las horas sol para cada día en particular, debería de contarse con alrededor de 3, 652 datos, pero esto no es posible, debido a fallos en las estaciones, como lo muestra la Tabla 3-5 referente al mes de enero, existen días en los que no se guardó información.

Tabla 3-5 Datos de Hora sol de los meses de enero y febrero de la estación A-18.

Fecha	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
1-ene.	4.00	2.00		4.00	6.00		5.10	6.20		
2-ene.	5.00			3.00	1.00		7.60	7.50		
3-ene.	5.00	1.00		7.00	5.00		7.80	5.40		
4-ene.	4.00	1.00		2.00	2.00	3.00	7.30	5.40		
5-ene.	4.00	1.00		4.00	5.00	7.00	5.60	6.30		
6-ene.	1.00	4.00		7.00	3.00	6.00	5.50	6.30		
7-ene.	3.00	4.00		7.00	5.00	6.00	3.90	2.50		
8-ene.	3.00	4.00		7.00	1.00	6.00	8.30	3.50		
9-ene.	4.00	2.00		6.00	3.00	4.00	9.10	5.10		
10-ene.	2.00	3.00		6.00		5.00	5.40	5.20		
11-ene.	4.00	4.00		8.00		4.00	6.70	4.20		
12-ene.	1.00	3.00		6.00		6.00	7.90	4.40		
13-ene.	4.00	3.00		4.00		4.00	5.30	4.00		
14-ene.	1.00	4.00		2.00		5.00	2.90	3.70		
15-ene.	3.00	4.00		6.00	1.00	7.00	2.60	4.20		
16-ene.		3.00		3.00	1.00	4.00	4.40			

17-ene.	1.00	4.00			6.00	6.00	2.90			
18-ene.		2.00		3.00	7.00	6.00	5.00			
19-ene.	3.00	4.00		8.00	7.00	3.00	3.60	3.10		
20-ene.	4.00	4.00		8.00	6.00	7.00	4.00	4.80		
21-ene.	5.00	2.00		7.00	4.00	8.00		3.80		
22-ene.	5.00	4.00		5.00	4.00	1.00	6.30	4.30		
23-ene.	5.00	3.00		6.00	4.00	7.00	5.40			
24-ene.	5.00	4.00		5.00	1.00		5.60			
25-ene.	1.00	4.00		5.00	2.00		3.00	2.40		
26-ene.	5.00	4.00		6.00	6.00	7.00	4.70	1.90		
27-ene.	5.00	4.00		2.00	6.00		4.80			
28-ene.	4.00	2.00		8.00	8.00	6.00	4.50			
29-ene.	4.00	4.00		1.00	5.00	7.00	4.60	3.70		
30-ene.	3.00	4.00		6.00	5.00	7.00		3.40		
31-ene.	5.00	2.00		1.00	7.00	8.00	7.70	4.30		

Como se explicaba al inicio al tratarse de un sistema de adquisición de datos automatizado hay ocasiones en las que la ausencia de datos puede ser de hasta meses en la Tabla 3-6 se muestra los promedios mensuales de horas sol diaria, es posible apreciar las celdas de color rojo que son meses completos sin tomar datos y en el caso de los años 2017 y 2018 no registraron ningún dato, esto debido a fallas en el sistema o mantenimientos prolongados de los mismos.

Tabla 3-6 Promedios mensuales de las horas sol diaria de la estación A-18.

Etiquetas de fila	Prom. 2009	Prom. 2010	Prom. 2011	Prom. 2012	Prom. 2013	Prom. 2014	Prom. 2015	Prom. 2016	Prom. 2017	Prom. 2018
enero	3.55	3.13		5.10	4.27	5.60	5.43	4.40		
febrero	5.19	4.30	6.00	6.92	6.43	6.75	6.71	6.24		
marzo	7.26	6.90	7.00	7.73	6.61	6.90	6.13	5.69		
Abril	7.60	4.69	6.03	7.14	5.03	6.04	6.76			
mayo	4.35	6.57	5.27	4.08	4.96	4.34	7.11	4.65		
junio	4.36	3.67	4.72	3.83	4.68	4.84	6.54	4.88		
julio	6.90	4.35	4.68	6.53	5.65	7.35	6.69	6.83		
agosto	6.87	3.73	5.04	6.03	5.17	7.60	7.35	5.68		

septiembre	5.13	2.77	3.54	3.75	3.27	4.99	5.88	5.08		
octubre	4.83	3.38	5.06	4.93	4.27	4.51	4.62			
noviembre	2.92	3.07	5.57	5.33	3.84	3.99	3.85			
diciembre	2.96		4.69	3.79	2.85	3.86	3.35	2.82		
Total general	5.24	4.25	5.30	5.61	4.86	5.64	6.04	5.28		

ESTACIÓN A-31: PLANES DE MONTECRISTO

La estación A-31 ubicada en las coordenadas Lon: -89.36° y Lat: 14.40° como muestra la Figura 3-5.

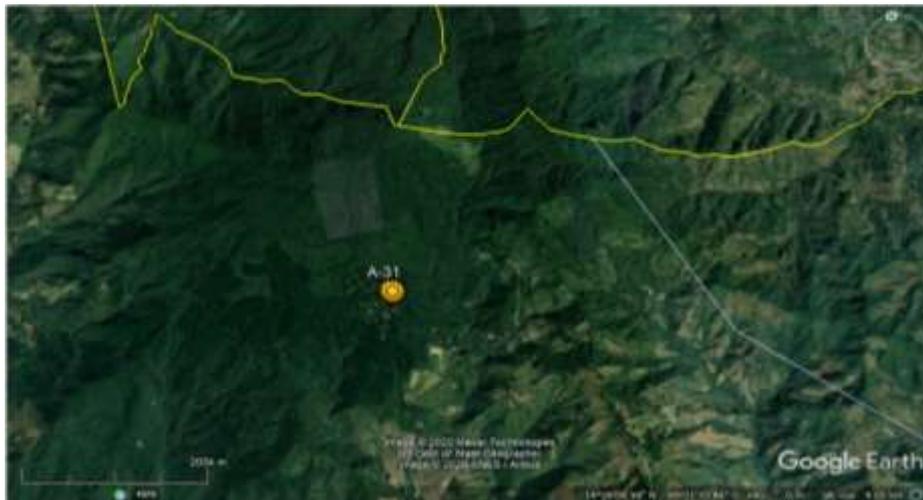


Figura 3-5 Ubicación de la Estación A-31. Ubicada en Planes de Montecristo, departamento de Santa Ana, municipio de Metapan.

En la Tabla 3-7 se muestran los promedios mensuales de hora sol diaria correspondiente a la estación A-31, al igual que la estación anterior presenta ausencia de datos por meses completos, para el 2017 solamente se registraron datos por tres meses y una ausencia total de datos para el año 2018.

Tabla 3-7 Promedios mensuales de horas sol diaria de la estación A-31.

Etiquetas de fila	Prom. 2009	Prom. 2010	Prom. 2011	Prom. 2012	Prom. 2013	Prom. 2014	Prom. 2015	Prom. 2016	Prom. 2017	Prom. 2018
Enero	7.45	8.42	7.68	7.45	7.58	7.81	7.92	7.65		
Febrero	7.21	7.46	6.96	8.04	7.61	7.71	7.99	8.55		
Marzo	7.93	7.90	7.50	7.90	7.50	6.68		5.43		

Abril	7.33	4.70	5.48	6.21	5.13	5.90	5.88	5.99		
Mayo	4.00	5.70	5.10	4.32	4.50	4.03	6.12	5.83		
Junio	3.79	3.88	4.76	5.04	4.50	3.93	6.40	4.06		
Julio	7.16	4.34	4.57	7.29	5.73	6.87	5.89	6.77		
Agosto	6.55	2.96	4.55	5.23	5.10		6.54	5.66	5.15	
Septiembre	4.71	3.45	3.97	5.40	2.96	3.87	3.44	4.22		
Octubre	4.94	5.47	5.00	5.80	4.87	4.92	5.09	6.43	6.03	
Noviembre	6.07	6.86		7.90	6.32	6.67	6.02	6.93	7.32	
Diciembre	7.42	8.16	7.39	7.68	6.84	7.48	7.13	7.12		
Total General	6.24	5.92	5.75	6.55	5.75	6.00	6.28	6.25	6.20	

ESTACIÓN A-37: SANTA ANA UNICAES

La estación A-37 ubicada en las coordenadas Lon: -89.55° y Lat: 13.98° como muestra la Figura 3-6.

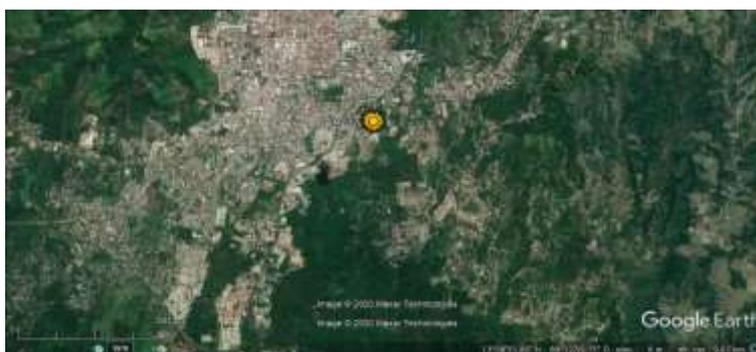


Figura 3-6 Ubicación de la estación A-37. Ubicada en la Universidad Católica de El Salvador, Santa Ana.

La Tabla 3-8 muestra la ausencia de datos para tres meses completos del año 2016 y una ausencia completa para los años 2017 y 2018, al tratarse una tabla de promedios mensuales es posible apreciar la ausencia de datos en el resto de los años donde los datos faltantes no ocurrieron por más de un mes consecutivo, sino que solamente fueron datos faltantes por días al azar.

Tabla 3-8 Promedios mensuales de hora sol diaria correspondiente a la estación A-37

Etiquetas de fila	Prom. 2009	Prom. 2010	Prom. 2011	Prom. 2012	Prom. 2013	Prom. 2014	Prom. 2015	Prom. 2016	Prom. 2017	Prom. 2018

Enero	7.83	8.19	8.35	7.94	7.68	7.55	8.11	7.49		
Febrero	8.75	8.18	8.04	7.36	7.75	7.50	8.03	8.18		
Marzo	8.81	8.71	8.61	8.65	8.27	7.90	8.00	6.82		
Abril	8.33	6.59	6.80	7.57	6.31	7.10	8.05			
Mayo	6.65	7.38	7.03	5.37	5.97	6.43	8.46	6.79		
Junio	6.63	5.26	6.04	5.28	5.67	5.76	6.75	6.09		
Julio	8.37	5.37	6.65	7.71	6.77	7.70	7.83	7.91		
Agosto	8.23	4.79	5.87	6.39	7.30	7.74	8.78	7.14		
Septiembre	7.30	5.45	5.50	7.30	4.70	6.51	5.98	6.51		
Octubre	7.53	6.97	6.90	6.52	6.77	5.70	6.36			
Noviembre	7.36	7.67	7.90	7.97	6.70	7.75	6.75			
Diciembre	8.10	8.81	8.13	8.00	7.19	8.23	7.79	7.39		
Total General	7.80	7.00	7.18	7.18	6.76	7.19	7.61	7.13		

ESTACIÓN G-03: NUEVA CONCEPCIÓN

La estación G-03 ubicada en las coordenadas Lon: -89.29° y Lat: 14.12° como muestra la Figura 3-7.

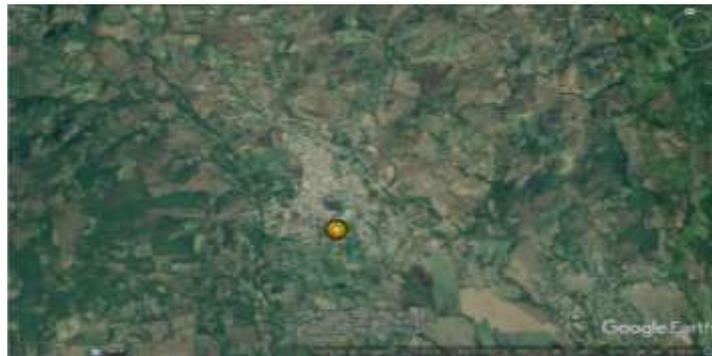


Figura 3-7 Ubicación de la estación G-03. Ubicada en Nueva Concepción, Chalatenango.

La estación G-03 presenta ausencia de datos en muchos días, pero estas no son pérdidas consecutivas por más de un mes, por tanto, la Tabla 3-9 muestra que solamente en el año 2016 presenta una ausencia de datos por 4 meses y de igual manera que la mayoría de las estaciones tiene una ausencia completa de datos para los años 2017 y 2018.

Tabla 3-9 Promedios mensuales de hora sol diaria correspondiente a la estación G-03.

Etiquetas de fila	Prom. 2009	Prom. 2010	Prom. 2011	Prom. 2012	Prom. 2013	Prom. 2014	Prom. 2015	Prom. 2016	Prom. 2017	Prom. 2018
Enero	9.00	9.13	9.06	8.71	8.52	9.26	9.02	8.74		
Febrero	9.50	9.07	8.64	8.36	8.96	9.25	9.54	9.78		
Marzo	8.97	9.42	9.16	9.39	8.97	9.00	8.35	7.86		
Abril	8.80	7.50	7.67	8.03	7.77	8.13	8.15			
Mayo	7.16	6.75	7.45	6.37	7.00	7.20	8.03	7.61		
Junio	7.10	5.83	6.45	5.80	6.37	6.08	6.44	6.06		
Julio	8.03	6.13	7.06	7.61	7.16	8.30	7.12	7.29		
Agosto	8.10	5.81	6.61	7.03	7.03	7.34	8.26	6.95		
Septiembre	7.77	5.78	6.53	7.43	5.71	6.57	6.34	6.58		
Octubre	8.33	8.19	7.35	7.42	7.06	6.47	6.98			
Noviembre	7.97	8.40	8.50	8.23	7.73	8.69	7.60			
Diciembre	8.39	9.39	8.81	8.65	8.13	8.79	8.72			
Total General	8.26	7.64	7.79	7.76	7.54	7.93	7.91	7.60		

ESTACIÓN L-04: SAN ANDRÉS

La estación L-04 ubicada en las coordenadas Lon: 89.41° y Lat: 13.81° como muestra la Figura 3-8.

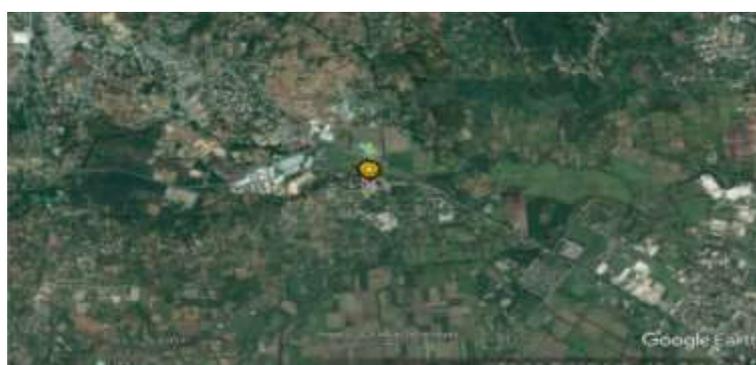


Figura 3-8 Ubicación de la estación L-04. Ubicada en San Andrés, departamento de La Libertad

La Tabla 3-10 muestra que en efecto la mayoría de las estaciones presenta falta de datos incluso de más de 30 días continuos como en los años 2017 y 2018.

Tabla 3-10 Promedios mensuales de hora sol diaria para la estación L-04.

Etiquetas de fila	Prom. 2009	Prom. 2010	Prom. 2011	Prom. 2012	Prom. 2013	Prom. 2014	Prom. 2015	Prom. 2016	Prom. 2017	Prom. 2018
Enero	8.97	9.13	8.74	8.26	8.35	8.87	8.25	7.76		
Febrero	9.39	8.93	9.29	8.61	8.75	9.07	9.24	9.58		
Marzo	9.35	9.06	8.94	9.39	9.06	8.94	8.12	7.80		
Abril	9.17	6.62	6.80	7.27	6.60	8.13	7.82			
Mayo	7.32	6.92	6.52	5.00	6.28	6.23	7.59	6.45		
Junio	6.50	5.00	5.45	5.14	5.93	5.65	5.76	5.26		
Julio	8.68	5.34	6.40	7.16	6.35	8.04	6.72	7.11		
Agosto	9.16	4.40	5.65	6.13	6.66	7.02		6.74		
Septiembre	7.87	4.69	5.17	6.77	4.79	5.20	5.60	5.46		
Octubre	7.43	7.32	6.92	7.16	6.97	5.92	6.51	7.35		
Noviembre	7.07	8.20	8.53	8.30	7.20	7.86	7.09			
Diciembre	8.10		7.71	7.81	7.45	7.49	6.86			
Total General	8.26	6.92	7.18	7.25	7.05	7.39	7.26	7.07		

Debido a la falta de datos como se ha podido observar es necesario generar los datos faltantes, este proceso se explica a continuación.

3.4.2- GENERACIÓN DE DATOS

En el caso de ausencia de datos que se encuentran dentro de una matriz es necesario usar métodos de correlación o modelos que describan el comportamiento de los datos obtenidos, de manera que se puedan llenar los huecos que forman la ausencia de los datos. Para la presente investigación se determinó que los huecos generados por los datos faltantes presentaban una considerable cantidad, por lo que se decidió elaborar un programa que pudiera ser capaz de generar un modelo de comportamiento de irradiancia según los datos existentes.

3.4.2.1- PREDICTOR LINEAL

La predicción lineal es una función capaz de estimar valores futuros de una señal de tiempo discreto, por medio de operaciones matemáticas a partir de una señal con muestras anteriores. El concepto de predicción lineal es muy utilizado en el

campo de procesamiento de señales digitales, es por ello que forma parte de la teoría del filtro. Los valores de $x(n)$ se pueden aproximar por una combinación lineal de las últimas p muestras, esto conlleva a realizar una predicción lineal de la siguiente muestra como una suma ponderada de muestras anteriores.

$$\hat{x}[n] = \sum_{k=1}^P -a_k x[n-k] \quad \text{Ec. 3.4.2a}$$

El modelo de predicción lineal presenta una serie de limitaciones, dentro de las cuales se encuentra el cálculo de los coeficientes de predicción lineal a_k directamente de la señal muestreada, debido al proceso y la abstracción matemática que esto implica es bastante alto. Sin embargo, existen dos métodos utilizados para dar solución al cálculo de los coeficientes: el método de autocorrelación y el método de covarianza. La autocorrelación se basa en asumir que la señal muestreada está definida dentro de una ventana, es decir, que las muestras que la conforman son finitas y se asigna a cada una un peso. La solución por medio de este método implica la resolución de un sistema de ecuaciones mediante la inversión de una matriz de Toeplitz simétrica.

El método de covarianza define un rango en que el error cuadrático medio tiene un valor diferente de cero y, además, utiliza las muestras de la señal sin asignarles un peso. Al igual que con el método de la autocorrelación, el modelo de la covarianza implica la resolución de una matriz simétrica pero no Toeplitz, por lo cual la solución del sistema de ecuaciones es mucho más complicada. Es por ello que para esta investigación se utiliza la resolución del método de autocorrelación por medio de software.

3.4.2.2- MÉTODO DE AUTOCORRELACIÓN

Para que el error del predictor lineal sea eficiente, debe de minimizar el error tal como en el método de mínimos cuadrados, de manera que para un valor futuro $x[n+r]$, los coeficientes $|a_k|$ proporcionen el mínimo error posible.

$$E = \sum_n |x[n+r] - \hat{x}[n]|^2 \quad \text{Ec. 3.4.2b}$$

El error lineal del modelo se encuentra como la diferencia de la muestra original y la predicción realizada a la misma, tal y como lo describe la ecuación *Ec. 3.4.2c*.

$$e[n] = x[n + r] - \hat{x}[n]$$

$$e[n] = x[n + r] - \sum_{k=1}^P a_k x[n - k] \quad \text{Ec. 3.4.2c}$$

El predictor que se muestra en *Ec.3.4.2a* puede ser escrito como un sistema de ecuaciones lineales en forma matricial, donde se pueden obtener los coeficientes a_k . El sistema mostrado en la *Ec.3.4.2d* se obtiene aplicando el algoritmo para la autocorrelación, el cual consiste en tomar la señal muestreada y multiplicarla por sí misma, pero con un desfase aplicado.

$$\begin{bmatrix} x[0] & x[1] & x[2] & \dots & x[P-1] \\ x[1] & x[0] & x[1] & \dots & x[P-2] \\ x[2] & x[1] & x[0] & \dots & x[P-3] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x[p-1] & x[p-2] & x[p-3] & \dots & x[0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x[P] \\ x[P+1] \\ x[P+2] \\ \vdots \\ x[N-1] \end{bmatrix} \quad \text{Ec. 3.4.2d}$$

La matriz del sistema de ecuaciones mostrado en *Ec.3.4.2d* se conoce como una matriz Toeplitz simétrica, debido a que las diagonales de esta poseen los mismos datos. Al solucionar la matriz de Toeplitz se obtienen los valores para los coeficientes a dependiendo del orden P que se elija para el predictor, y una vez obtenidos pueden ser sustituidos en *Ec 3.4.2a* para obtener una estimación del siguiente dato de la seri muestreada.

3.4.2.3- CODIFICACIÓN DE ALGORITMO

Para la generación del código encargado de ejecutar el algoritmo que soluciona la función del predictor se utilizó el software MATLAB, ya que el software facilita las operaciones matemáticas complejas por medio de librerías ya cargadas que pueden ser utilizadas en forma de función.

Para el cálculo de los a_k se utiliza la función llamada: 'xcorr(x)' la cual retorna una matriz de $2M - 1$ con los valores de la autocorrelación de la señal de entrada. Se crea una variable que contenga los últimos $N-1$ datos de la matriz de correlación,

mientras que en otra variable diferente se almacenan los mismos datos $N-1$ pero retrasados una muestra. A los datos almacenados se les aplica la función 'Toeplitz' que convierte los datos en una matriz Toeplitz simétrica de $P \times P$, la cual multiplicada por la autocorrelación con retraso, devuelve los P coeficientes a_k . Al resultado se aplica la transpuesta debido que para operarlo se necesita que un vector de tipo columna. Lo antes descrito se muestra en las siguientes líneas de código:

```
Rs = xcorr(x);
R = Rs(length(x):length(x)+p-1);
d = Rs(length(x)+1:length(x)+p);
RT = toeplitz(R);
a = RT\d;
a = a';
```

Con los a_k calculados se procede a resolver la ecuación Ec 3.4.2a tomando como datos todas las muestras que posee la señal, y asumiendo un predictor de orden $P=6$. El orden del predictor se calculó en base a la observación, prueba y error, ya que no se encontró forma de calcular un orden adecuado por medio de un cálculo matemático. Se observó la funcionabilidad del predictor a partir del orden $P=1$, hasta $P=10$, al momento de aumentar el orden del predictor el resultado se acercaba más a la línea de tendencia que dibujaban las muestras de datos, sin embargo, a partir de orden $P=6$ los datos generados por el predictor comenzaban a alejarse de la curva, por esta razón se definió el orden $P=6$ como valor adecuado para los datos de esta investigación. Para dar solución a la ecuación del predictor se utiliza la función 'filter' y el resultado es almacenado en una nueva variable que contiene las muestras estimadas de la señal en estudio; el cálculo de la siguiente muestra se realiza utilizando ciclos 'for' anidados. Se crea una variable que representa un nuevo vector que contiene la muestra predicha junto a los datos originales de la serie muestreada. Se utiliza la función 'vertcat' para unir la muestra predicha con los datos originales. Como se muestra en las siguientes líneas de código:

```
k = 0;
for i=1:p
    k = k + a(i)*x(l+1-i);
end
npred = vertcat(x,k);
for j = 1:r-1;
```

```

k = 0;
l = l + 1;
for i=1:p
    k = k + a(i)*npred(l+1-i);
end
npred = vertcat(npred,k);
end

```

3.4.2.4- CÓDIGO FINALIZADO

Para utilizar el programa es necesario crear un archivo tipo 'txt' y agregar los datos en forma de columna, los datos que deben cargarse son todas las muestras de correlativa hasta que aparezca un hueco donde no exista dato registrado para ese día, es allí donde ejecutamos el predictor lineal y el dato que obtenemos como resultado es la predicción estimada para ese día en cuestión, este dato es agregado al archivo 'txt' que contienen los datos totales junto con los siguientes datos que se obtienen hasta volver a encontrar otro hueco en los datos. De esta forma se asegura que si se necesita realizar otra predicción el programa tomara en cuenta todos los datos históricos posibles.

Se encontraron estaciones de medición las cuales carecían de datos por largos periodos de tiempo, donde los resultados del programa se alejaban de la curva media conforme se agregaban datos predichos de forma consecutiva y prolongada. Por esta razón y para minimizar el error agregado a la base de datos cada vez que se realiza una ejecución del predictor lineal, se creó la siguiente condición: *“Si el siguiente dato a predecir forma parte de un conjunto de 5 datos predichos de manera consecutiva, el dato a predecir será considerado como el valor representativo del mes”*. Para que el dato predicho con la condición anterior no se aleje de la tendencia que presenta la curva de datos, la última muestra a evaluar por el predictor corresponde al valor representativo del mes anterior, de esta manera se minimizo la incertidumbre que los datos predichos agregaba a la base de datos. De manera que, si no existían datos de un mes completos, el predictor lineal solo se ejecutaba una vez, sobre el día representativo de dicho mes, el resultado era reproducido para todos los días del mes en cuestión. Si por otro lado el mes en estudio presentaba más de 5 huecos dentro de su matriz de datos, el

predicador de igual forma era ejecutado sobre el día representativo del mes, y el resultado era reproducido en todos los huecos que el mes presentaba.

A continuación, el código final:

```
%Programa predicador lineal usando el método de autocorrelación, para generar datos
r = 4;
graf=load('data.txt');
x = graf(1:length(graf));
l = length(x);
p = 6;
%Calculando los ak
Rs = xcorr(x);
R = Rs(length(x):length(x)+p-1);
d = Rs(length(x)+1:length(x)+p);
RT = toeplitz(R);
a = RT\d;
a = a';
%calculando el predicador
pred = filter(a,1,x);
k = 0;
for i=1:p
    k = k + a(i)*x(l+1-i);
end
npred = vertcat(x,k);
for j = 1:r-1;
    k = 0;
    l = l + 1;
    for i=1:p
        k = k + a(i)*npred(l+1-i);
    end
    npred = vertcat(npred,k);
end
r1 =(length(npred)-3); disp(r1)
```

3.4.3- FILTRADO DE DATOS

Una vez los datos faltantes han sido generados, surge otro problema y es que no todos los datos son correctos, esto debido a que el sistema de toma de datos puede fallar momentáneamente y tomar registro de un dato incorrecto, para evitar que este dato incorrecto genere un peso considerable sobre el resultado final es necesario de alguna forma filtrar esos datos.

En la siguiente figura se muestra el mes de enero del 2014, las barras azules corresponden al valor promedio medido para cada uno de los días, es evidente como el dato del día 22 es un error ya que viendo la secuencia del resto de valores y considerando de que es temporada seca por tanto ese nivel tan bajo no es debido a un día lluvioso, se puede observar la línea verde correspondiente al promedio del mes que es inferior a la línea roja que corresponde a la mediana, esto es debido a

que el promedio se ve afectado por los valores extremos disminuyendo así en caso de errores de datos bajos y aumentando si el error es un dato alto, para mitigar estos efectos los datos se promediaron usando la mediana, como ya se sabe esta hace una estimación del valor central de un conjunto de datos, garantizando así que los datos atípicos como el día 22 no tendrán un efecto sobre el valor final.

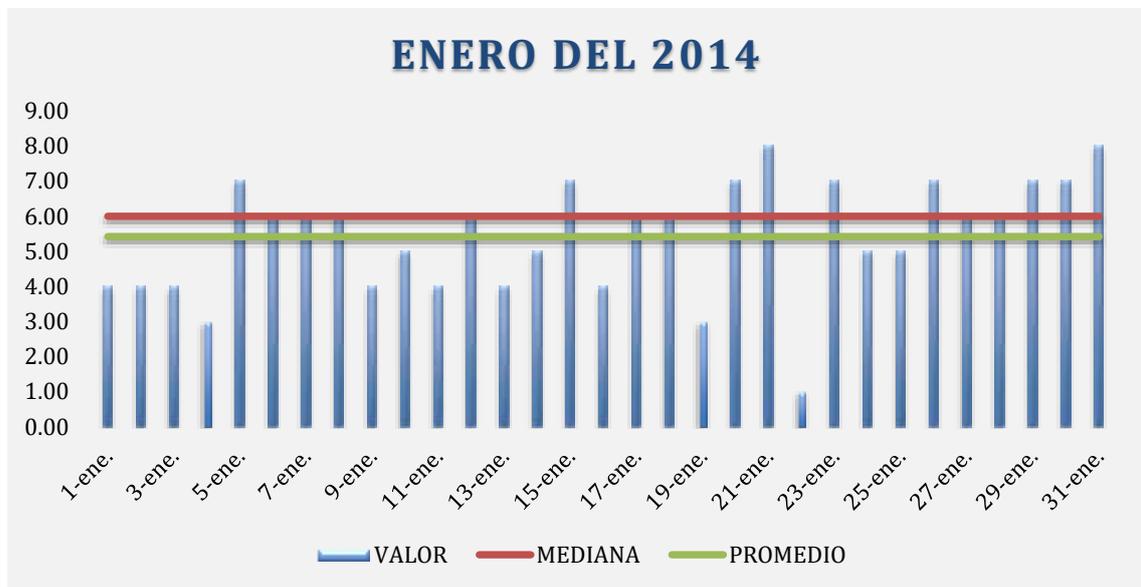


Figura 3-9 Niveles de luz solar enero 2014 estación A-18.

Continuado, con el ejemplo del año 2014 y tomando la estación A-18 se cuenta con 365 datos uno por cada día, de estos se promedió cada mes usando la mediana el resultado se muestra en la siguiente figura donde la línea azul representa cada uno de los datos diarios mientras que la roja representa la mediana mensual.

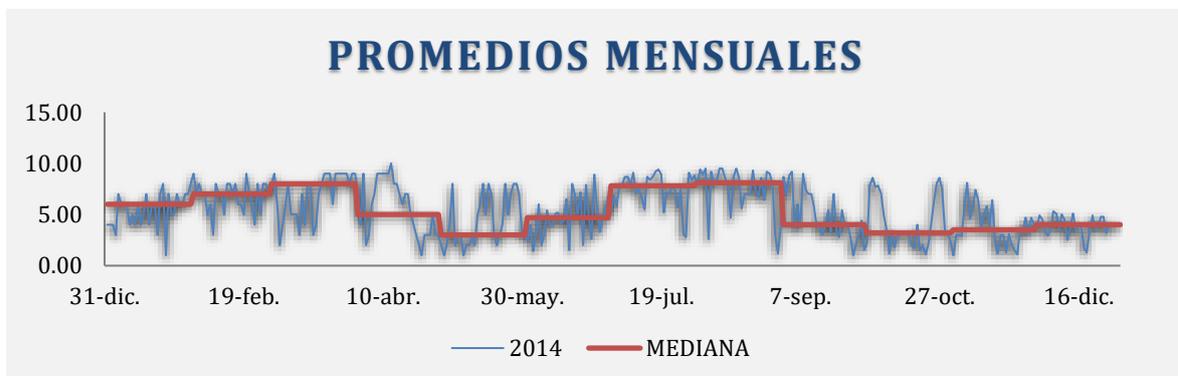


Figura 3-10 Niveles de luz solar del 2014 de la estación A-18.

Por tanto, los promedios mensuales se obtuvieron usando la mediana para reducir el efecto de los datos atípicos presentes en los registros, y los promedios anuales se obtuvieron promediando los meses, de esta forma se redujo el error que

aportarían los datos extremos que se registraron cuya tendencia era atípica en conjunto con el resto de los datos las siguientes tablas muestran los resultados.

Tabla 3-11 Niveles de horas de luz solar promedio mensuales y anual.

EST.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANU
A-18	3.56	4.46	5.03	4.19	3.73	3.47	4.10	4.33	3.69	3.88	3.72	3.25	4.09
A-31	5.17	5.42	5.19	3.89	3.60	3.28	4.07	4.04	3.45	4.06	4.86	4.99	4.27
A-37	5.43	5.67	5.89	5.31	4.92	4.56	5.15	5.25	5.12	5.19	5.33	5.30	5.31
B-10	4.90	5.16	5.33	4.88	4.60	4.28	4.49	4.69	4.67	4.86	4.66	4.60	4.78
G-03	5.42	5.77	5.77	5.35	4.92	4.59	4.92	5.07	5.16	5.29	5.38	5.33	5.29
H-14	5.30	5.48	5.56	5.00	4.57	4.12	4.51	4.59	4.64	4.81	5.22	5.11	4.91
L-04	4.83	5.23	5.20	4.76	4.39	3.98	4.39	4.54	4.47	4.73	4.81	4.58	4.63
M-24	4.66	4.95	5.20	4.70	4.39	4.09	4.29	4.65	4.77	4.74	4.74	4.48	4.66
N-02	5.10	5.46	5.54	5.28	4.96	4.61	4.93	5.22	5.20	5.23	5.10	4.97	5.18
S-10	5.89	6.27	6.23	5.51	5.10	4.71	5.15	5.40	5.23	5.70	6.13	5.83	5.62

Tabla 3-12 Niveles de horas de luz solar promedio de los últimos 10 años.

	PROM. 2009	PROM. 2010	PROM. 2011	PROM. 2012	PROM. 2013	PROM. 2014	PROM. 2015	PROM. 2016	PROM. 2017	PROM. 2018
A-18	4.09	3.14	3.88	4.30	3.46	3.82	4.55	4.11	4.21	4.09
A-31	4.51	3.66	3.87	4.30	3.66	4.76	4.25	4.44	4.21	4.49
A-37	5.48	5.11	5.11	5.43	5.20	5.48	5.57	5.11	5.42	5.19
B-10	4.78	4.78	4.70	4.78	4.53	4.76	4.79	4.78	4.87	4.77
G-03	5.48	5.34	5.20	5.34	5.20	5.31	5.27	5.12	5.33	5.27
H-14	5.11	4.97	4.68	5.11	4.75	5.16	4.86	4.74	4.96	4.81
L-04	5.03	4.66	4.53	4.78	4.53	4.78	4.64	4.62	4.63	4.59
M-24	4.79	4.66	4.71	4.79	4.66	4.53	4.70	4.61	4.65	4.61
N-02	5.27	5.27	5.27	5.27	4.98	5.01	5.36	5.09	4.98	4.95
S-10	5.85	5.67	5.49	5.85	5.49	5.59	5.89	5.65	5.15	5.23
CHI4	-	-	-	-	-	-	-	-	5.35	5.41
SV1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.30

3.5- CONVERSIÓN DE [HR] A [SR] USANDO EL ANÁLISIS ANGSTRÖM.

La dificultad de disponer de datos de radiación global diaria ha propiciado el desarrollo de modelos para su estimación, como la ecuación de Hargreaves que utiliza las variables meteorológicas temperatura máxima y mínima; el modelo de Prescott, derivado de Angström, requiere datos de horas brillo sol y el valor de Angot.

La red meteorológica del SNET registra parámetros de radiación global diaria, pero debido a que no fue posible adquirir esos datos, sino que en su lugar se nos proporcionaron datos de hora de brillo solar es necesario usar el modelo de estimación de Angström para conocer los valores de radiación solar de las estaciones mostradas en la sección anterior.

3.5.1- MODELO DE ESTIMACIÓN DE ANGSTRÖM

Para estimar los datos de radiación solar se usa la ecuación de regresión de Angström.

$$\frac{H}{H_c} = a + b \frac{n}{N} \quad \text{Ec. 3.5.1.1}$$

Donde:

H: Radiación diaria promedio mensual en una superficie horizontal.

Hc: Radiación diaria promedio en cielo abierto para la localidad y mes de interés (Teórico).

a y b: Constantes empíricas.

n: Promedio mensual de horas diarias de luz solar.

N: Promedio mensual de las horas máximas de luz solar diarias (Teórico).

El modelo de Angstrom parte del supuesto físico que hay una relación directa entre la radiación solar global y el brillo solar llegando a establecer:

$$Y = a + b X \quad \text{Ec. 3.5.1.2}$$

Dónde:

$Y = \frac{H}{H_c}$: Radiación medida entre la radiación extraterrestre.

$X = \frac{n}{N}$: Duración astronómica del día.

a y b: Coeficientes de regresión llamados coeficientes de Angström.

El trabajo de graduación “Actualización del Mapa de Radiación Solar de

El Salvador. 2014” presenta en la Tabla 2.5.1 La duración astronómica promedio del día, en la Tabla 2.5.2 la Radiación extraterrestres promedio [Hc] y en la Tabla 2.5.6 los coeficientes de Angström para cada una de las estaciones, datos que se presentan a continuación en la Tabla 3-13, Tabla 3-14 y Tabla 3-15 respectivamente.

Tabla 3-13 Duración Astronómica promedio del día

Códi.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anu.
A-18	11.29	11.57	11.93	12.31	12.63	12.79	12.73	12.46	12.1	11.72	11.39	11.21	12.01
A-31	11.25	11.55	11.93	12.33	12.67	12.84	12.77	12.48	12.11	11.71	11.35	11.17	12.01
A-37	11.27	11.56	11.93	12.32	12.65	12.81	12.74	12.47	12.1	11.71	11.37	11.19	12.01
B-10	11.28	11.56	11.93	12.32	12.64	12.81	12.74	12.47	12.1	11.72	11.37	11.2	12.01
G-03	11.27	11.55	11.93	12.32	12.65	12.82	12.75	12.48	12.1	11.71	11.37	11.18	12.01
H-14	11.28	11.56	11.93	12.32	12.64	12.8	12.74	12.47	12.1	11.72	11.38	11.2	12.01
L-04	11.28	11.57	11.93	12.32	12.64	12.8	12.73	12.46	12.1	11.72	11.38	11.2	12.01
M-24	11.3	11.58	11.93	12.31	12.62	12.78	12.71	12.45	12.1	11.73	11.4	11.23	12.01
N-02	11.31	11.58	11.94	12.31	12.61	12.77	12.71	12.45	12.1	11.73	11.4	11.23	12.01
S-10	11.29	11.57	11.93	12.31	12.63	12.79	12.73	12.46	12.1	11.72	11.39	11.21	12.01

Tabla 3-14 Radiación extraterrestre promedio [Hc].

Códi.	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anu.
A-18	9.4	9.85	10.11	9.97	9.58	9.32	9.44	9.83	10.09	9.99	9.58	9.27	9.7
A-31	9.37	9.83	10.09	9.94	9.56	9.29	9.41	9.81	10.07	9.96	9.55	9.24	9.68
A-37	9.39	9.85	10.11	9.96	9.58	9.31	9.43	9.83	10.09	9.98	9.57	9.26	9.69
B-10	9.4	9.85	10.11	9.97	9.58	9.31	9.43	9.83	10.09	9.98	9.58	9.26	9.7
G-03	9.39	9.84	10.1	9.96	9.57	9.31	9.42	9.82	10.08	9.98	9.57	9.25	9.69
H-14	9.4	9.85	10.11	9.97	9.58	9.32	9.44	9.83	10.09	9.99	9.58	9.27	9.7
L-04	9.4	9.85	10.11	9.97	9.58	9.32	9.44	9.84	10.1	9.99	9.58	9.27	9.7
M-24	9.42	9.87	10.13	9.99	9.6	9.34	9.45	9.85	10.11	10.01	9.6	9.29	9.72
N-O2	9.42	9.87	10.13	9.99	9.61	9.34	9.46	9.86	10.12	10.01	9.61	9.29	9.72
S-10	9.41	9.86	10.12	9.98	9.59	9.32	9.44	9.84	10.1	9.99	9.59	9.27	9.71

Tabla 3-15 Coeficientes Angström.

Códi.	elevación msnm	Estación Fuente	a	b
A-18	1752.00	A-31	0.18	0.52
A-31	1857.00	A-31	0.18	0.52
A-37	665.00	S-27	0.27	0.45
B-10	207.00	N-15	0.29	0.30
G-03	327.00	G-3	0.30	0.35
H-14	43.00	U-11	0.27	0.36
L-04	480.00	V-13	0.29	0.31
M-24	108.00	N-15	0.29	0.30
N-O2	12.00	U-11	0.27	0.36
S-10	624.00	S-27	0.27	0.45

Con los valores obtenidos en las tablas anteriores y sustituyendo los valores en la siguiente ecuación será posible estimar el valor de la radiación solar promedio mensual.

$$\text{Radiación} = \left(a + b \frac{\text{Horas de sol medidos}}{\text{Duración Astronomica del día}} \right)$$

* Radiación extraterrestre prom Ec. 3.5.1.3

3.5.2- RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE ANGRÖM

Sustituyendo cada uno de los valores respectivos a cada una de las estaciones en la ecuación Ec. 3.5.1.3 fue posible estimar la radiación promedio mensual de cada una de las 10 estaciones del SNET, estos valores se muestran en la Tabla 3-16.

Tabla 3-16 Radiación Solar promedio mensual [kWh/m²].

CÓDI.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANU.
A-18	3.56	4.46	5.03	4.19	3.73	3.47	4.10	4.33	3.69	3.88	3.72	3.25	4.09
A-31	5.17	5.42	5.19	3.89	3.60	3.28	4.07	4.04	3.45	4.06	4.86	4.99	4.27
A-37	5.43	5.67	5.89	5.31	4.92	4.56	5.15	5.25	5.12	5.19	5.33	5.30	5.31
B-10	4.90	5.16	5.33	4.88	4.60	4.28	4.49	4.69	4.67	4.86	4.66	4.60	4.78
G-03	5.42	5.77	5.77	5.35	4.92	4.59	4.92	5.07	5.16	5.29	5.38	5.33	5.29
H-14	5.30	5.48	5.56	5.00	4.57	4.12	4.51	4.59	4.64	4.81	5.22	5.11	4.91
L-04	4.83	5.23	5.20	4.76	4.39	3.98	4.39	4.54	4.47	4.73	4.81	4.58	4.63
M-24	4.66	4.95	5.20	4.70	4.39	4.09	4.29	4.65	4.77	4.74	4.74	4.48	4.66
N-02	5.10	5.46	5.54	5.28	4.96	4.61	4.93	5.22	5.20	5.23	5.10	4.97	5.18
S-10	5.89	6.27	6.23	5.51	5.10	4.71	5.15	5.40	5.23	5.70	6.13	5.83	5.62

La Tabla 3-16 muestra la radiación solar anual de los últimos 10 años.

Tabla 3-17 Radiación Solar promedio anual [kWh/m²].

EST.	PROM. 2009	PROM. 2010	PROM. 2011	PROM. 2012	PROM. 2013	PROM. 2014	PROM. 2015	PROM. 2016	PROM. 2017	PROM. 2018
A-18	4.09	3.14	3.88	4.30	3.46	3.82	4.55	4.11	4.21	4.09
A-31	4.51	3.66	3.87	4.30	3.66	4.76	4.25	4.44	4.21	4.49
A-37	5.48	5.11	5.11	5.43	5.20	5.48	5.57	5.11	5.42	5.19
B-10	4.78	4.78	4.70	4.78	4.53	4.76	4.79	4.78	4.87	4.77
G-03	5.48	5.34	5.20	5.34	5.20	5.31	5.27	5.12	5.33	5.27
H-14	5.11	4.97	4.68	5.11	4.75	5.16	4.86	4.74	4.96	4.81
L-04	5.03	4.66	4.53	4.78	4.53	4.78	4.64	4.62	4.63	4.59
M-24	4.79	4.66	4.71	4.79	4.66	4.53	4.70	4.61	4.65	4.61
N-02	5.27	5.27	5.27	5.27	4.98	5.01	5.36	5.09	4.98	4.95
S-10	5.85	5.67	5.49	5.85	5.49	5.59	5.89	5.65	5.15	5.23
CHI4	-	-	-	-	-	-	-	-	5.35	5.41
SV1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.30

3.6- MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN

La interpolación predice valores para las celdas de un ráster a partir de una cantidad limitada de puntos de datos de muestra. Puede utilizarse para prever valores desconocidos de cualquier dato de un punto geográfico, tales como: elevación, precipitaciones, concentraciones químicas, niveles de ruido y como en nuestro caso radiación solar.

La suposición que hace que la interpolación sea una opción viable es que los objetos distribuidos espacialmente están correlacionados espacialmente; es decir, las cosas que están cerca tienden a tener características similares. Por ejemplo, si llueve de un lado de la calle, se puede prever con un alto nivel de confianza que está lloviendo del otro lado de la calle. Tendría menos certeza sobre si está lloviendo en todo el pueblo, y menos aún acerca del estado del tiempo en el departamento vecino.

Con esta analogía, resulta sencillo ver que los valores de los puntos cercanos a los puntos de muestra tienen más posibilidades de ser similares que los que están más alejados. Esta es la base de la interpolación. El uso que le daremos a la interpolación de punto es crear el mapa de radiación solar de El Salvador partir de un conjunto de mediciones de muestra.

Los diferentes métodos de interpolación desarrollados pueden dividirse en dos tipos fundamentales: Métodos globales, utilizan toda la muestra para estimar el valor en cada nuevo punto. Métodos locales, utilizan solo los puntos de muestreo más cercanos.

3.6.1- MÉTODOS GLOBALES

Los métodos globales asumen la dependencia de la variable a interpolar de otras variables de apoyo. Pueden darse dos situaciones en función del tipo de variable de apoyo que se utilice:

3.6.1.1- MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN

La variable de apoyo es cualitativa (usos del suelo, tipos de suelo o roca, etc.).

En este caso se asume que la variable adopta en cada punto el valor medio correspondiente al valor de la variable de apoyo en ese punto. Por ejemplo, si se trata de interpolar el contenido en arcilla de los suelos, puede utilizarse el tipo de suelo como variable de apoyo y asignar a cada suelo su contenido medio de arcilla. Estos métodos se basan en una serie de premisas que no se cumplen necesariamente:

- Las variaciones de Z dentro de las diferentes clases de V son aleatorias y no auto correlacionadas espacialmente.
- Z está normalmente distribuida en cada clase y su media y varianza es la misma en todas las manchas de una misma clase.
- Los cambios en la variable Z en las fronteras entre clases se producen de forma brusca.

El resultado es equivalente a una reclasificación que produce un mapa en el que los diferentes valores de V se transforman en valores de Z .

3.6.1.2- MÉTODOS DE REGRESIÓN

Implican, como su nombre indica, un análisis de regresión previo a partir del cual se genera un modelo de interpolación de tipo polinómico. Generalmente se utilizan X e Y (longitud y latitud normalmente en coordenadas UTM) como variables de apoyo ya que no necesitan de ninguna medición, y también alguna variable cuantitativa V espacialmente distribuida, un ejemplo habitual es la altitud, y otras variables topográficas derivadas, por su facilidad de medida, su evidente relación con casi todos los procesos ambientales y por las posibilidades que un SIG ofrece en cuanto al tratamiento de la elevación e información derivada. No resulta recomendable utilizar polinomios de grado mayor que 3 ya que, a pesar de un ajuste cada vez mejor, se hacen cada vez más sensibles a los valores extremos con lo que cualquier error en los datos podría generar distorsiones importantes en el resultado final.

En ambos casos (clasificación y regresión) se requiere un análisis estadístico previo para determinar que los datos se ajustan al modelo estadístico implicado.

El problema de los métodos globales es que sólo consiguen modelizar una componente a escala global de la estructura de variación, pero no las componentes a escala más detallada, por tanto, se utilizan para filtrar esa componente global y eliminarla de los valores medidos para, posteriormente, estimar tan sólo la componente local mediante métodos locales.

3.6.2- MÉTODOS LOCALES BASADOS EN MEDIAS PONDERADAS

Los métodos locales se basan en la utilización de los puntos más cercanos al punto de interpolación para estimar la variable Z en este, llamaremos al conjunto de puntos más cercanos conjunto de interpolación. Asumen autocorrelación espacial y estiman los valores de Z como una media ponderada de los valores de un conjunto de puntos de muestreo cercanos. Exigen tomar una serie de decisiones:

1. Decidir qué puntos cercanos van a formar parte del conjunto de interpolación en función de los siguientes criterios:
 - Aquellos cuya distancia al punto de interpolación sea inferior a un valor umbral r
 - Los n puntos más cercanos al punto de interpolación

El semivariograma nos permite determinar un valor de distancia de forma objetiva, lógicamente el valor umbral no debe superar el valor del alcance de este.

- 2.Cuál será el método de interpolación
 - La solución más simple es asignar el valor del punto más cercano (método del vecino más próximo), se utilizó antes de la existencia de ordenadores ya que resultaba sencillo hacerlo a mano. Suele dar peores resultados que los demás
 - Media de los valores de los puntos incluidos en el conjunto de interpolación.
 - Sin embargo, es lógico pensar que cuanto más apartados estén dos puntos más diferentes serán sus valores de Z . Para tener en cuenta este hecho se utilizan medias ponderadas utilizando como factor de ponderación el inverso de la distancia elevado a algún exponente k (generalmente $k = 2$).

- Utilización del kriggeado, método desarrollado en el marco de la teoría geoestadística y que utiliza toda la información procedente del semivariograma para obtener unos factores de ponderación optimizados.

Uno de los problemas más importantes de los métodos basados en medias ponderadas es que, como su propio nombre indica, interpolan basándose en el valor medio de un conjunto de puntos situados en las proximidades, por tanto, nunca se van a obtener valores mayores o menores que los de los puntos utilizados para hacer la interpolación. En consecuencia, no se van a interpolar correctamente máximos o mínimos locales y además los puntos de muestreo aparecen en el mapa final como máximos y mínimos locales erróneos

3.6.3- DESCRIPCIÓN DE MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN.

A continuación, se describen tres métodos de interpolación siendo estos una opción aceptable para la interpolación de los datos y la generación del mapa de irradiancia de El Salvador, el objetivo de esta sección no es el de estudiar las ecuaciones que describe cada método, sino el describir el funcionamiento y poder ver cuál método nos proporciona resultados más acordes al comportamiento de la radiación solar. (en la bibliografía se presentan los enlaces para estudiar más a fondo cada uno de estos métodos).

3.6.3.1- INTERPOLACIÓN IDW.

La interpolación mediante distancia inversa ponderada determina los valores de celda a través de una combinación ponderada linealmente de un conjunto de puntos de muestra. La ponderación es una función de la distancia inversa. La superficie que se interpola debe ser la de una variable dependiente de la ubicación.

Este método presupone que la variable que se representa cartográficamente disminuye su influencia a mayor distancia desde su ubicación de muestra. Por ejemplo, observe la Figura 3-11, al interpolar una superficie de poder adquisitivo de los consumidores para analizar las ventas minoristas de un sitio (punto amarillo), el poder adquisitivo de una ubicación más distante (puntos negros) tendrá menos

influencia porque es más probable que las personas compren cerca de sus casas (puntos rojos).

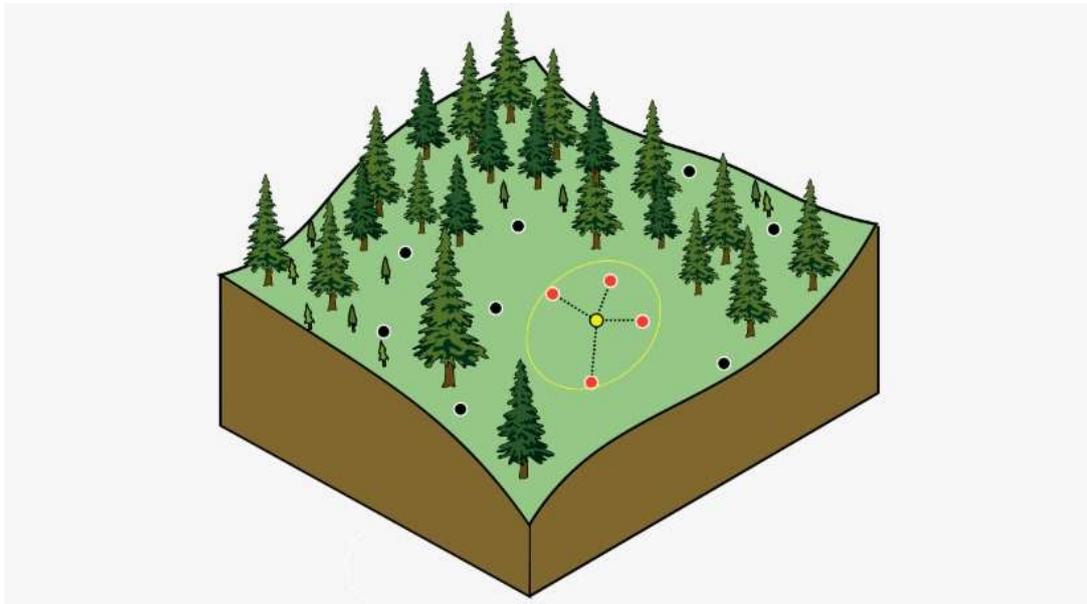


Figura 3-11 Interpolación mediante Distancia Inversa Ponderada.

El método IDW está basado principalmente en la inversa de la distancia elevada a una potencia matemática. El parámetro Potencia le permite controlar la significancia de puntos conocidos en los valores interpolados basándose en la distancia desde el punto de salida. Es un número real positivo y su valor predeterminado es 2.

Al definir un valor de potencia más alto, se puede poner más énfasis en los puntos más cercanos. Entonces, los datos cercanos tendrán más influencia y la superficie tendrá más detalles (será menos suave). A medida que aumenta la potencia, los valores interpolados comienzan a acercarse al valor del punto de muestra más cercano. Al especificar un valor más bajo de potencia, los puntos circundantes adquirirán más influencia que los que están más lejos, lo que resulta en una superficie más suave.

Debido a que la fórmula de IDW no está relacionada con ningún proceso físico real, no hay forma de determinar que un valor de potencia en particular es demasiado grande. Como guía general, una potencia de 30 se considera extremadamente grande y su uso sería cuestionable. También tenga en cuenta que, si las distancias o el valor de potencia son grandes, los resultados pueden ser incorrectos.

3.6.3.2- INTERPOLACIÓN KRING.

El método de interpolación IDW (Distancia inversa ponderada) es considerado como un método de interpolación determinístico porque está basado directamente en los valores medidos circundantes o en fórmulas matemáticas específicas que determinan la suavidad de la superficie resultante. Hay una segunda familia de métodos de interpolación que consta de métodos geoestadísticos, como kriging, que está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Gracias a esto, las técnicas de estadística geográfica no solo tienen la capacidad de producir una superficie de predicción, sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones.

Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. Kriging ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación. Kriging es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie.

La autocorrelación espacial cuantifica un principio básico de geografía: es más probable que las cosas que están más cerca sean más parecidas que las que están más alejadas. Entonces, los pares de ubicaciones que están más cerca deberían tener valores más similares. A medida que los pares de ubicaciones estén más separados entre sí, deberían ser más distintos y tener una diferencia cuadrada más grande.

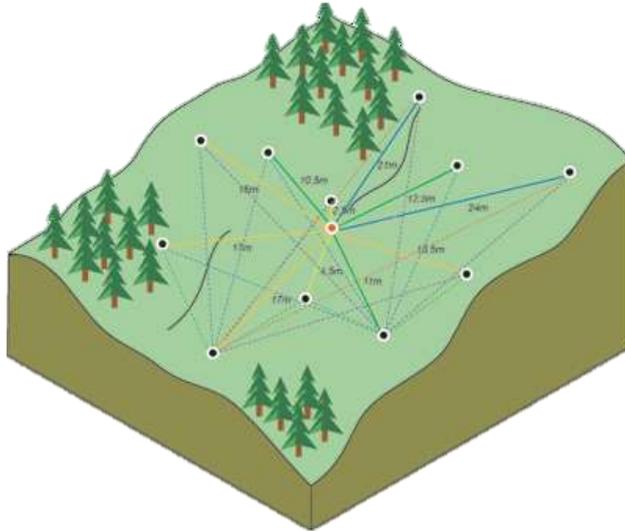


Figura 3-12 Interpolación mediante Kriging.

Kriging proporciona diferentes modelos del semivariograma empírico: Circular, Esférica, Exponencial, Gaussiana, Lineal.

El modelo seleccionado influye en la predicción de los valores desconocidos, en particular cuando la forma de la curva cercana al origen difiere significativamente. Cuanto más pronunciada sea la curva cercana al origen, más influyen los vecinos más cercanos en la predicción. Como resultado, la superficie de salida será menos suave. Cada modelo está diseñado para ajustarse a diferentes tipos de fenómenos de forma más precisa

Por último, existen dos métodos Kriging: ordinario y universal.

El kriging ordinario es el más general y utilizado de los métodos kriging. Presupone que el valor medio constante es desconocido. Esa es una presuposición razonable a menos que haya una razón científica para rechazarla.

El kriging universal presupone que hay una tendencia de invalidación en los datos, por ejemplo, un viento prevaleciente, y puede modelarse a través de la función determinística polinómica. Esta función polinómica se resta de los puntos medidos originalmente y la autocorrelación se modela a partir de los errores aleatorios. Una vez que el modelo se ajusta a los errores aleatorios y antes de realizar una predicción, se vuelve a sumar la función polinómica a las predicciones para obtener resultados significativos. El kriging universal solo se debe utilizar si se conoce una tendencia en los datos y se puede dar una justificación científica para describirla.

3.6.3.3- INTERPOLACIÓN SPLINE DE CURVATURA MÍNIMA.

Conceptualmente, los puntos de muestra extruden hasta la altura de su magnitud. Spline curva una hoja de goma que pasa a través de los puntos de entrada y minimiza a la vez la curvatura total de la superficie. Ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos de entrada más cercanos mientras pasa a través de los puntos de muestra. Este método es mejor para generar superficies que varían levemente, como la elevación, la altura de las tablas de agua o las concentraciones de contaminación.

La forma básica de la curvatura mínima de interpolación por Spline impone las siguientes dos condiciones en el interpolante:

- La superficie debe pasar exactamente por los puntos de datos.
- La superficie debe tener una curvatura mínima. La suma acumulativa de los cuadrados de los términos de la derivada segunda de la superficie tomada sobre cada punto de la superficie debe ser un mínimo.

La técnica de curvatura mínima básica también se conoce como interpolación por lámina delgada. Asegura una superficie suave (continua y diferenciable), junto con superficies continuas de derivada primera. En las inmediaciones de los puntos de datos pueden ocurrir cambios rápidos en la gradiente o pendiente (derivada primera), por lo que este modelo no es adecuado para estimar la derivada segunda (curvatura).

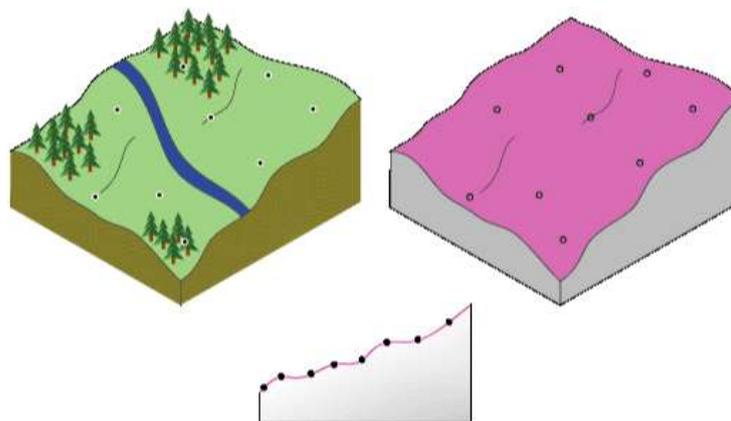


Figura 3-13 Interpolación mediante Spline.

Hay dos tipos de Spline: Regularizado y de Tensión.

- El tipo Regularizado crea una superficie suave que cambia gradualmente con valores que pueden estar fuera del rango de datos de muestra. El tipo Tensión controla la rigidez de la superficie en función del carácter del fenómeno modelado. Crea una superficie menos suave con valores que están más restringidos por el rango de datos de la muestra.
- Tipo de spline de tensión está modifica el criterio de minimización para que los términos de la derivada primera se incorporen a los criterios de minimización. La superficie interpolada es suave. Las derivadas primeras son continuas, pero no suaves.

4-CAPÍTULO IV: ACTUALIZACIÓN DEL MAPA DE RADIACIÓN SOLAR.

Previamente se habló sobre los métodos de interpolación, es en este capítulo donde se verá la utilidad de ellos para estimar los valores de radiación solar en cada uno de los puntos dentro de los límites geográficos de El Salvador.

Se presentará un acercamiento al Software utilizado, acompañado de la guía para la generación de los mapas, posteriormente se analizarán los mapas obtenidos y se compararán con los mapas de estudios anteriores.

4.1- GENERACIÓN DE MAPAS USANDO GMT Y QGIS.

GMT es capaz de generar mapas de una gran calidad, en diferentes proyecciones, resoluciones, colores y muchos otros efectos. Es por este motivo por el cual se ha empleado para generar la interpolación del mapa de radiación solar de El Salvador.

QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License . QGIS es un proyecto oficial de Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Corre sobre Linux, Unix, Mac OSX, Windows y Android y soporta numerosos formatos y funcionalidades de datos vector, datos ráster y bases de datos, usado para la creación y edición de los mapas.

4.1.1- INTRODUCCIÓN A LOS SOFTWARES.

A continuación, se presenta una breve introducción de los dos principales softwares de código abierto usados en este estudio.

4.1.1.1- HERRAMIENTAS PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS GMT.

GMT (Generic Mapping Tools) o, herramientas para la generación de mapas, es un paquete gratuito de programas, compuesto de aproximadamente 80 archivos de comandos y bases de datos, para la elaboración de datos geográficos y, en general, para la representación de datos en dos y tres dimensiones, incluyendo algoritmos de filtrado, proyección, superposición de mallas, etc.

El módulo SURFACE o superficie en español es una tabla de datos de cuadrícula que utiliza una interpolación splines de curvatura mínima de tensión ajustable (**sección 3.6.3.3 Interpolación Spline de curvatura mínima**).

El programa no posee GUI, es decir una interfaz gráfica de usuario como otras aplicaciones, funciona mediante la línea de comandos, como lo muestra la Figura-4-1.

Por tanto, la generación del mapa se hace a través de instrucciones en líneas de código, a continuación, se muestra el esquema de los parámetros que puede llevar el módulo "surface" de GMT.

```

C:\ GMT Command Prompt
c:\programs\gmt6
      GMT - The Generic Mapping Tools, Version 6.0.0 [64-bit] [MP] [2 cores]
      (c) 1991-2019 The GMT Team (https://www.generic-mapping-tools.org/team.htm).

Supported in part by the US National Science Foundation (http://www.nsf.gov/)
and volunteers from around the world.

GMT is distributed under the GNU LGPL License (http://www.gnu.org/licenses/lgpl.html).

usage: gmt [options]
      gmt <module name> [<module-options>]

options:
  --help                List descriptions of available GMT modules.
  --new-script[=L]     Write GMT modern mode script template to stdout.
                       Optionally specify bash|csh|batch [Default is current shell]

  --show-bindir        Show directory with GMT executables.
  --show-citation      Show the most recent citation for GMT.
  --show-cores         Show number of available cores.
  --show-datadir       Show directory/ies with user data.
  --show-dataserver    Show URL of the remote GMT data server.
  --show-doi           Show the DOI for the current release.
  --show-modules       Show all module names.
  --show-library       Show path of the shared GMT library.
  --show-plugindir    Show directory for plug-ins.
  --show-sharedir     Show directory for shared GMT resources.
  --version            Print GMT version number.

if <module-options> is '=' we call exit (0) if module exist and non-zero otherwise.

c:\Users\Deiby>

```

Figura 4-1 Línea de comandos de GMT.

gmt surface [table] **-G** outputfile.nc **-I** increment **-R** region [**-A** Aspect_ratio | m] [**-C** convergence_limit [%]] [**-D** breakline_file] [**-LI** inferior] [**-Lu** superior] [**-M** max_radius [u]] [**-N** max_iterations] [**-Q**] [**-S** search_radius [m|s]] [**-T** [yo|b] factor_tensión] [**-V** [nive|]] [**-Z** sobrefactor de relajación] [**-a** banderas] [**-bi** binario] [**-di** nodata] [**-e** regexp] [**-f** banderas] [**-h** encabezados] [**-i** flags] [**-r** reg] [**-:** [i|o]] [**--PAR** = valor]

Nota: No se permite espacio entre el indicador de opción y los argumentos asociados.

Al ejecutar la acción en la línea de comando las lecturas de superficie espaciadas aleatoriamente (x, y, z) se triplican a partir de la entrada estándar [o tabla] y produce un archivo de cuadrícula binaria de valores cuadrículados z(x, y) resolviendo la ecuación Ec. 4.1.1.1

$$(1 - T) * L(L(z)) + T * L(Z) = 0 \quad \text{Ec. 4.1.1.1}$$

Donde:

T: es un factor de tensión entre 0 y 1.

L: indica el operador laplaciano.

$T = 0$ proporciona la solución de "curvatura mínima". La curvatura mínima puede causar oscilaciones no deseadas y máximos o mínimos locales falsos, para suprimir estos efectos es posible utilizar $T > 0$. La experiencia sugiere que $T \sim 0.25$ generalmente se ve bien para datos de campo potenciales y T debería ser mayor ($T \sim 0.35$) para datos de topografía empinada. $T = 1$ da una superficie armónica (no son posibles máximos o mínimos excepto en los puntos de datos de control).

Este módulo cuenta con argumentos requeridos los cuales se detallan a continuación:

- **-G** *outputfile.nc*:
Corresponde al nombre del archivo de salida. La salida es un archivo binario 2-D del tipo .nc. Es de tener en cuenta que la dimensión de cuadrícula más pequeña debe ser al menos 4.
- **-I** *xinc [unidad] [+e|n] [/ yinc [unidad] [+e|n]]*:
x_inc [y opcionalmente *y_inc*] es el espaciado de la cuadrícula. Opcionalmente, se agrega un modificador de sufijo. Coordenadas geográficas (grados) : se agrega **m** para indicar minutos de arco o **s** para indicar segundos de arco. Si se agrega una de las unidades **e** , **f** , **k** , **M** , **n** o **u** , se supone que el incremento se da en metros, pies, km, millas, millas náuticas o pies topográficos de EE. UU., respectivamente.
- **-R** *xmin / xmax / ymin / ymax [+r] [+u unidad]*
xmin , *xmax* , *ymin* e *ymax* especifican la región de interés. Para las regiones geográficas, estos límites corresponden al oeste , este , sur y norte y puede especificarlos en grados decimales o en $[\pm]dd:mm[:ss.xxx][W | E | S | N]$

Además, el módulo SURFACE proporciona algunos argumentos opcionales como los siguientes:

- **-C** *límite_convergencia [%]* = Límite de convergencia.

- **-D** *línea de corte* = Línea de corte suave.
- **-Li inferior** y **-Lu superior** = Imponer límites a la solución de salida.
- **-N** *max_iteraciones* = Número de iteraciones.
- **-Q** = Sugiera dimensiones de cuadrícula.
- **-V** [nivel] = Nivel de verbosidad.
- **-Z** *factor de sobre-relajación* = Este parámetro se usa para acelerar la convergencia; es un número entre 1 y 2 (Predeterminado = 1.4 converge rápidamente y casi siempre es estable.)
- **-S** *radio_búsqueda* [m | s] = Radio de búsqueda en las mismas unidades que los datos x, y; agregue **m** para indicar minutos de arco o **s** para segundos de arco.
- **-T** [i | b] *factor_tensión* = *Factor de tensión* [s]. Deben estar entre 0 y 1. La tensión se puede usar en la solución interior (ecuación anterior) y en las condiciones límite (donde tiende a aplanar la solución que se aproxima a los bordes). El uso de cero para ambos valores da como resultado una superficie de curvatura mínima con bordes libres, es decir, una spline bicúbica natural. Use **-Ti** *tension_factor* para establecer la tensión interior y **-Tb** *tension_factor* para establecer la tensión límite. Si no antepones **i** o **b** , ambos se establecen en el mismo valor. [Predeterminado = 0 para ambos da una solución de curvatura mínima.]

Para la unidad del mapa de distancias, **d** para el grado de arco, **m** para el arco minutos, y **s** para segundo arco, o **e** para metro [Default], **f** para el pie, **k** para kilómetro, **M** para millas estatuto, **n** para milla náutica, y **u** para pie de encuesta de EE. UU. Por defecto, calculamos tales distancias usando una aproximación esférica con grandes círculos.

Ejemplo: Para una cuadrícula de 5 por 5 minutos, el bloque de gravedad significa a partir de los datos ASCII en hawaii_5x5.xy, usando un *tension_factor* = 0.25, un *convergence_limit* = 0.1 miligal, escribiendo el resultado en un archivo llamado hawaii_grd.nc, y monitoreando cada iteración:

```
gmt surface 115awaii_5x5.xy -R198/208/18/25 -I5m -Ghawaii_grd.nc -T0.25 -C0.1 -VI
```

4.1.1.2- QGIS UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).

Al igual que los demás SIG, QGIS proporciona una creciente gama de capacidades a través de sus funciones básicas y complementos. Se puede visualizar, gestionar, editar y analizar datos y diseñar mapas imprimibles todo esto con la generación y administración de capas. A continuación, se presentan las convenciones generales que deben de tenerse en cuenta al trabajar con este software.

Los estilos de convención de la GUI están destinados a imitar la apariencia de la GUI como se muestra a continuación.

- Opciones de menú: **Capa** ▶ **Agregar una capa ráster** o **configuraciones** ▶ **Barras de herramientas** ▶ **Digitalización**

- Herramienta: Agregar una capa ráster 

- Botón: **Guardar como predeterminado**

- Título del cuadro de diálogo: **Propiedades de capa**

- Pestaña: **General**

- Casilla de verificación: **Renderizar**

- Botón de radio: **Postgis SRID EPSG ID**

- Selecciona un número:

- Selecciona una cadena:

- Busque un archivo: ...

- Selecciona un color:

- Control deslizante

- Texto de entrada: Display name

Una sombra indica un componente de GUI en el que se puede hacer clic.

También incluye estilos relacionados con texto, comandos de teclado y codificación para indicar diferentes entidades, como clases o métodos. Estos estilos no corresponden a la apariencia real de ningún texto o codificación dentro de QGIS.

- Hipervínculos: <https://qgis.org>
- Combinaciones de pulsaciones de teclas: Ctrl+Bpresione, lo que significa presionar y mantener presionada la tecla Ctrl y luego presionar la tecla B.
- Nombre de un archivo: lakes.shp
- Nombre de una clase: **NewLayer**
- Método: *classFactory*
- Servidor: *myhost.de*
- Texto del usuario: qgis --help

QGIS ofrece muchas funciones GIS comunes proporcionadas por características y complementos principales. A continuación, se presenta un breve resumen de cuatro categorías generales de características.

VER DATOS:

Se puede ver combinaciones de datos vectoriales y ráster (en 2D o 3D) en diferentes formatos y proyecciones sin conversión a un formato interno o común.

Los formatos admitidos incluyen:

- Tablas y vistas habilitadas espacialmente con PostGIS, SpatiaLite y MS SQL Spatial, Oracle Spatial, formatos vectoriales compatibles con la biblioteca OGR instalada, incluidos GeoPackage, ESRI Shapefile, MapInfo, SDTS, GML y muchos más.
- Formatos de trama e imágenes compatibles con la biblioteca GDAL (Biblioteca de abstracción de datos geoespaciales) instalada, como GeoTIFF, ERDAS IMG, ArcInfo ASCII GRID, JPEG, PNG y muchos más.

- Datos raster y vectoriales de GRASS de bases de datos GRASS (ubicación / conjunto de mapas).
- Los datos espaciales en línea sirvieron como servicios web de OGC, incluidos WMS, WMTS, WCS, WFS y WFS-T.

EXPLORE DATOS Y REDACTE MAPAS

Se puede componer mapas y explorar interactivamente datos espaciales con una GUI amigable. Las muchas herramientas útiles disponibles en la GUI incluyen:

- Navegador QGIS
- Reproyección sobre la marcha
- Gerente de DB
- Diseño de impresión
- Panel de resumen
- Marcadores espaciales
- Herramientas de anotación
- Identificar / seleccionar características
- Editar / ver / buscar atributos
- Etiquetado de características definidas por datos
- Herramientas de simbología vectorial y ráster definidas por datos
- Composición del mapa del atlas con capas de retícula
- Flecha norte, barra de escala y etiqueta de copyright para mapas
- Soporte para guardar y restaurar proyectos

CREAR, EDITAR, ADMINISTRAR Y EXPORTAR MAPAS

Se puede crear, editar, administrar y exportar capas vectoriales y ráster en varios formatos. QGIS ofrece lo siguiente:

- Herramientas de digitalización para formatos compatibles con OGR y capas vectoriales GRASS
- Capacidad para crear y editar múltiples formatos de archivo y capas vectoriales de GRASS
- Complemento georreferenciador para geocodificar imágenes
- Herramientas GPS para importar y exportar formato GPX, y convertir otros formatos GPS a GPX o bajar / cargar directamente a una unidad GPS (en Linux, usb: se ha agregado a la lista de dispositivos GPS)
- Soporte para visualizar y editar datos de OpenStreetMap
- Posibilidad de crear tablas de bases de datos espaciales a partir de archivos con el complemento DB Manager
- Manejo mejorado de tablas de bases de datos espaciales
- Herramientas para gestionar tablas de atributos vectoriales
- Opción para guardar capturas de pantalla como imágenes georreferenciadas
- Herramienta de exportación DXF con capacidades mejoradas para exportar estilos y complementos para realizar funciones tipo CAD

ANALIZAR DATOS

Se puede realizar análisis de datos espaciales en bases de datos espaciales y otros formatos compatibles con OGR. QGIS actualmente ofrece herramientas de análisis de vectores, muestreo, geoprocésamiento, geometría y gestión de bases de datos. También puede usar las herramientas integradas de GRASS, que incluyen la funcionalidad completa de GRASS de más de 400 módulos. O bien, puede trabajar con el complemento de procesamiento, que proporciona un potente marco de

análisis geoespacial para llamar a algoritmos nativos y de terceros de QGIS, como GDAL, SAGA, GRASS y más.

Elementos básicos de la interfaz, cada una de estas secciones del software abren nuevas ventanas que ayudan a editar y administrar las capas que se están trabajando o el área de trabajo que se esté editando.

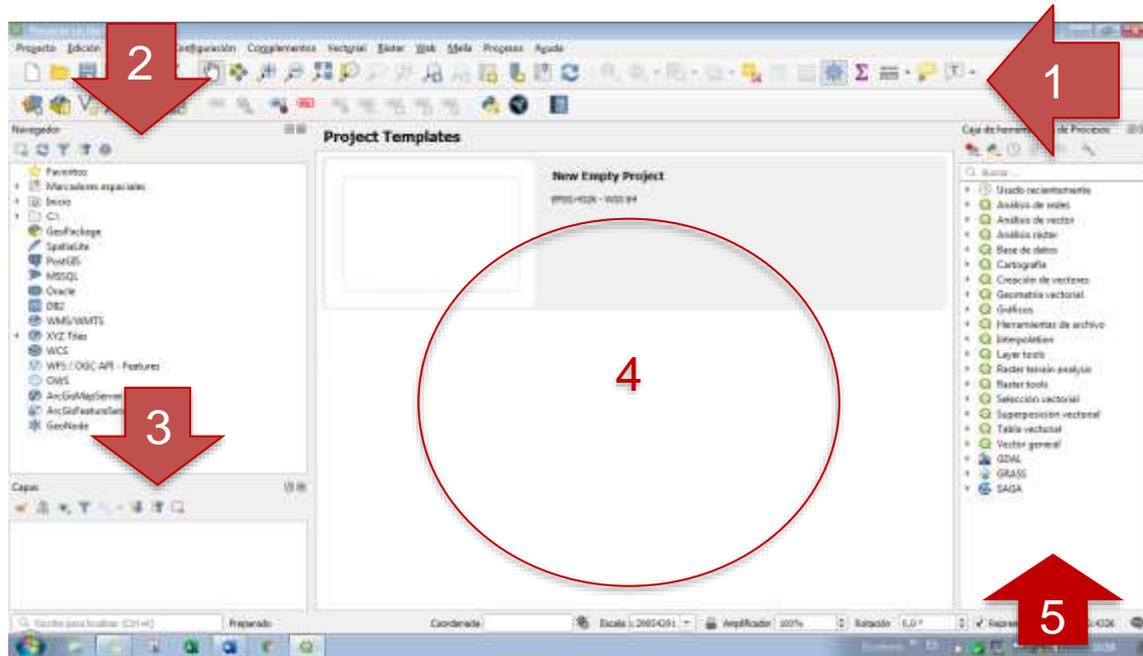


Figura 4-2 Interfaz de QGIS.

- 1- Barra de herramientas.
- 2- Panel de navegación.
- 3- Panel de capas.
- 4- Área de trabajo.
- 5- Caja de herramientas de procesos.

En la siguiente sección se explicarán los pasos tomados para la elaboración de los mapas generados en este estudio.

4.1.2- GENERACIÓN DE LA INTERPOLACIÓN

La generación de la interpolación se realizó con el método de interpolación Spline de curvatura mínima que proporciona el módulo de Surface de GMT.

4.1.2.1- . INTERPOLACIÓN USANDO SURFACE GMT.

Para generar la interpolación de los datos de radiación solar dentro del área de interés se utilizaron los valores de las Tabla 4-1 y Tabla 4-2.(siguiente pag.).

GENERACIÓN DE LA VENTANA DE INTERPOLACIÓN.

La línea de código para la generación de la interpolación del mapa de enero es la siguiente:

```
gmt surface enero.csv -Rg-90.31/-87.49/13.145/14.5 -I2.7m -Genero.nc -T0.4 -VI
```

A continuación, se describe cada uno de los argumentos presentes en la línea de código anterior.

Gmt surface: Corresponde a la llamada del módulo *SURFACE* de GMT, este módulo realiza una interpolación SPLINE de curvatura mínima de tensión ajustable.

enero.csv : Este es un fragmento de la Tabla 4-1 que contiene únicamente tres columnas (LON, LAT, ENE), estas columnas corresponden a las coordenadas X (Longitud) e Y (Latitud) y el valor Z que corresponde a los niveles de radiación solar promedio de cada una de las estaciones para el mes de enero

-Rg-90.31/-87.49/13.145/14.5 : Este describe el área de interés a interpolar

La siguiente figura muestra el rectángulo que contiene toda el área de interés, esta será el área interpolada por el módulo de surface.

.

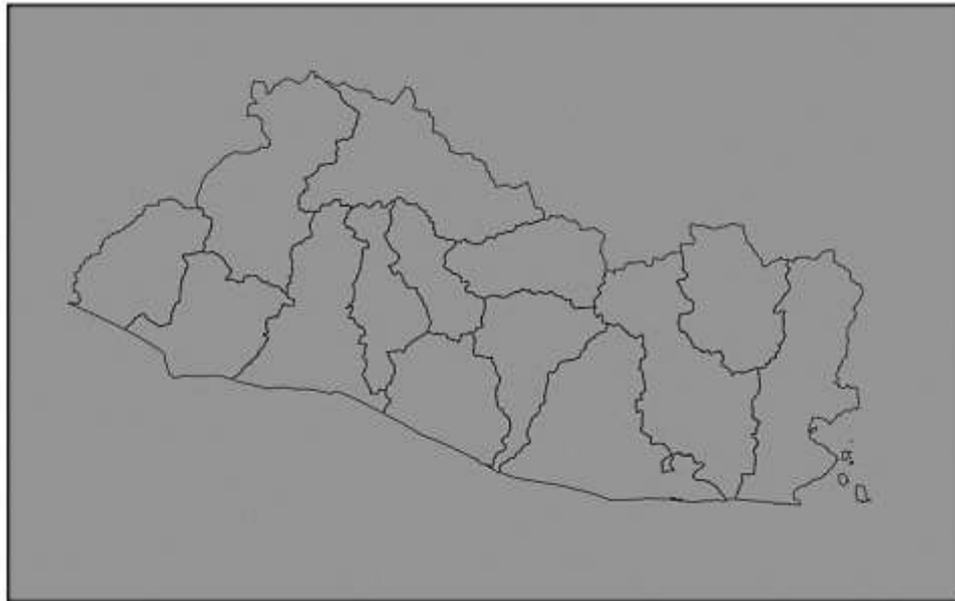


Figura 4-3 Área de interpolación.

-I2.7m : Genera una cuadrícula de 2.7 minutos de arco equivalente a 5km.

La siguiente figura muestra como la cuadrícula efectivamente tiene una resolución de 5km² por grilla.

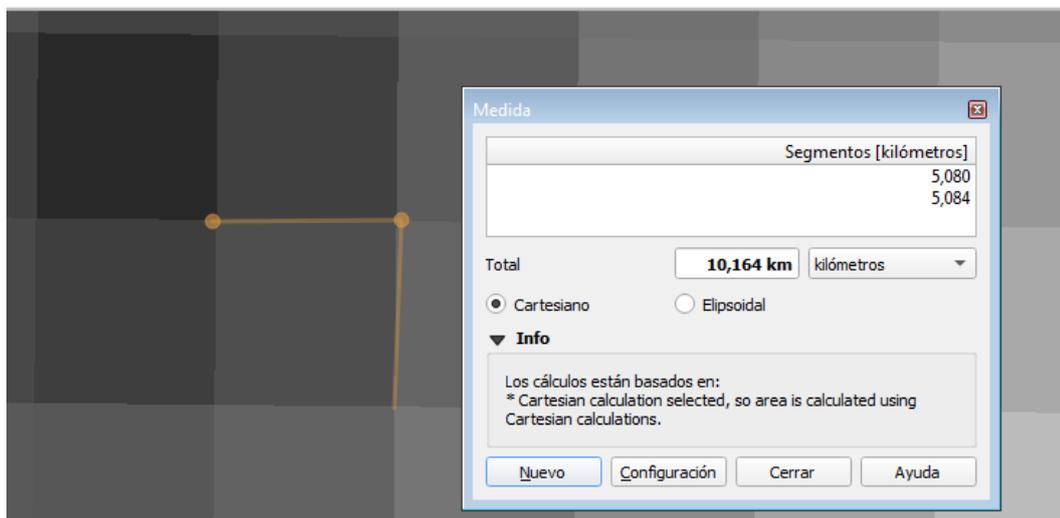


Figura 4-4 Cuadrículas de 5km².

-Genero.nc : El resultado de la interpolación se guardará en un archivo .nc con el nombre de enero.

-T0.4 : Utilizamos un factor de tensión de 0.4, este factor es el responsable de suavidad con la que se realiza la interpolación en la cuadrícula, a continuación, se mostrará el efecto que tiene el factor de tensión en la interpolación.

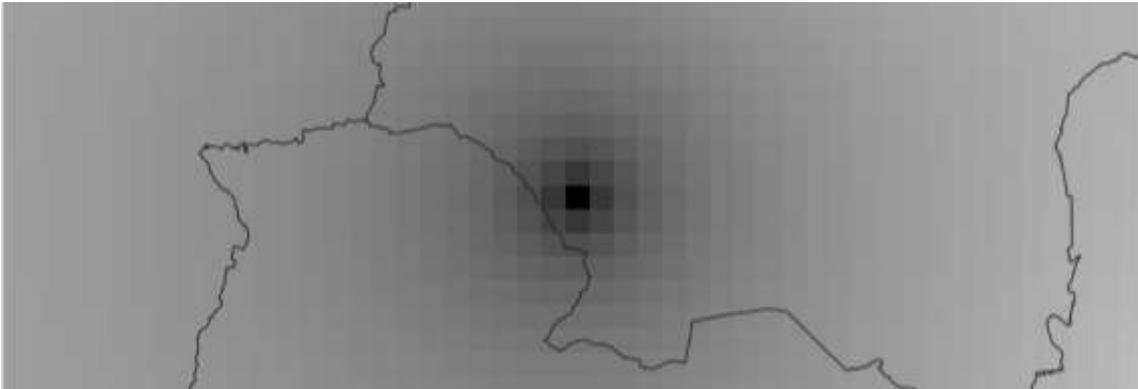


Figura 4-5 Interpolación con $T=1$

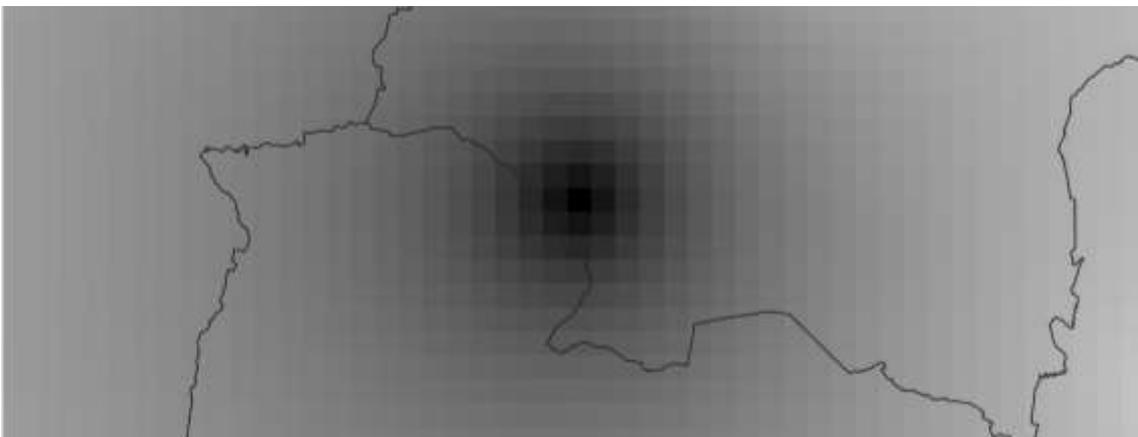


Figura 4-6 Interpolación con $T=0.5$

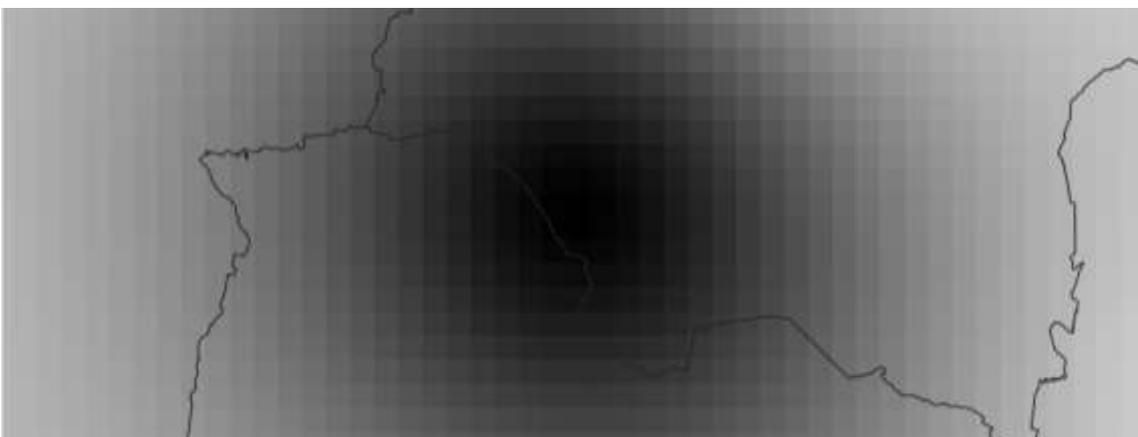


Figura 4-7 Interpolación con $T=0$

-VI : Esta instrucción permite monitorear cada iteración hasta la convergencia.

A continuación, se mostrar el monitoreo tras ejecutar la línea de código.

```

C:\Windows\system32\cmd.exe
-U1 I>C:\Users\Deiby\Documents\UES_FIA_EIE\Tesisssssssss\QGIS_pruebas\INTERPOLAC
ION\nada.nc
surface [INFORMATION]: Enable all available threads (up to 2)
surface [INFORMATION]: Given domain implies x_inc = 0.00333333
surface [INFORMATION]: Given domain implies y_inc = 0.00332924
surface [INFORMATION]: Grid domain: W: -90.31 E: -87.49 S: 13.145 N: 14.5 n_colu
ms: 846 n_rows: 407 [gridline registration]
surface [WARNING]: Your grid dimensions are mutually prime. Convergence is very
unlikely.
surface [INFORMATION]: Hint: Choosing -R-90.34/-87.46/13.10504914/14.5432800983
[n_columns = 864, n_rows = 432] might cut run time by a factor of 292.34652
surface [INFORMATION]: Hint: Choosing -R-90.4/-87.4/13.10504914/14.5432800983 [n
_columns = 900, n_rows = 432] might cut run time by a factor of 274.67837
surface [INFORMATION]: Hint: Choosing -R-90.34/-87.46/13.0251474201/14.623181818
2 [n_columns = 864, n_rows = 480] might cut run time by a factor of 263.26881
surface [INFORMATION]: Hint: Choosing -R-90.5/-87.3/13.10504914/14.5432800983 [n
_columns = 960, n_rows = 432] might cut run time by a factor of 262.41502
surface [INFORMATION]: Hint: Choosing -R-90.52/-87.28/13.10504914/14.5432800983
[n_columns = 972, n_rows = 432] might cut run time by a factor of 255.85174
surface [INFORMATION]: Hint: Choosing -R-90.4/-87.4/13.0750859951/14.5732432432
[n_columns = 900, n_rows = 450] might cut run time by a factor of 252.36856
surface [INFORMATION]: Hint: Choosing -R-90.34/-87.46/13.0750859951/14.573243243
2 [n_columns = 864, n_rows = 450] might cut run time by a factor of 251.2909
surface [INFORMATION]: Hint: Choosing -R-90.4/-87.4/13.0251474201/14.6231818182
[n_columns = 900, n_rows = 480] might cut run time by a factor of 247.32248
surface [INFORMATION]: Hint: Choosing -R-90.34/-87.46/12.9718796069/14.676449631
4 [n_columns = 864, n_rows = 512] might cut run time by a factor of 244.75399
surface [INFORMATION]: Hint: Choosing -R-90.34/-87.46/13.0151597052/14.633169533
2 [n_columns = 864, n_rows = 486] might cut run time by a factor of 243.57517
surface [INFORMATION]: Hint: After completion you can recover the desired region
via gmt grdcut
surface [INFORMATION]: Processing input table data
surface [INFORMATION]: Reading Data Table from file T_ENERO.csv
surface [INFORMATION]: Minimum value of your dataset x,y,z at: -88.1600036621 13
.4300003052 4.65999984741
surface [INFORMATION]: Maximum value of your dataset x,y,z at: -89.1200027466 13
.6899995804 5.88999986649
surface [INFORMATION]: Eliminate data points that are not nearest a node.
surface [INFORMATION]: Plane fit z = 5.54565 + (-0.000794812 * col) + (-0.000302
505 * row)
surface [INFORMATION]: Normalize detrended data constraints by z rms = 0.323056
surface [INFORMATION]: Select default convergence limit of 3.23056e-05 (100 ppm
of L2 scale)
surface [INFORMATION]: Recompute data index for next iteration [stride = 1]
surface [INFORMATION]:
surface [INFORMATION]: Memory for data array : 216 bytes
surface [INFORMATION]: Memory for final grid : 1.3 Mb
surface [INFORMATION]: Memory for Briggs coefficients : 216 bytes
surface [INFORMATION]: Memory for node status : 342.4 kb
surface [INFORMATION]:
surface [INFORMATION]: Total memory use : 1.7 Mb
surface [INFORMATION]: =====
surface [INFORMATION]: Grid Mode Iteration Max Change Conv Lim
it Total Iterations
surface [INFORMATION]: Set finite-difference coefficients [stride = 1]
surface [INFORMATION]: Determine nearest point and set Briggs coefficients [stri
de = 1]

```

Figura 4-8 Monitoreo de GMT surface.

4.1.2.2- RESULTADOS DE LA INTERPOLACIÓN.

En el Anexo D se mostrarán los resultados de las interpolaciones, se presentan 23 resultados los cuales contienen una grilla correspondiente a la información de radiación solar, posterior a su validación, estos datos serán procesados para darles una mejor presentación y facilitar la interpretación de estos.

A continuación, se muestra una tabla resumen con los valores máximos y mínimos de los resultados de la interpolación.

Tabla 4-3 Valores máximos y mínimos de las interpolaciones

VALORES	INTERPOLADOS			REALES (ESTACIONES)		
	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO
MAPA						
ENERO	3.59	5.85	4.72	3.56	5.89	5.03
FEBRERO	4.48	6.22	5.35	4.46	6.27	5.39
MARZO	5.04	6.20	5.62	5.03	6.23	5.49
ABRIL	3.78	5.51	4.64	3.89	5.51	4.89
MAYO	3.51	5.08	4.30	3.60	5.10	4.52
JUNIO	3.20	4.71	3.96	3.28	4.71	4.17
JULIO	4.02	5.13	4.57	4.07	5.15	4.60
AGOSTO	3.96	5.38	4.67	4.04	5.40	4.78
SEPTIEMBRE	3.33	5.37	4.35	3.45	5.23	4.64
OCTUBRE	3.91	5.67	4.79	3.88	5.70	4.85
NOVIEMBRE	3.75	6.08	4.92	3.72	6.13	5.00
DICIEMBRE	3.29	5.78	4.53	3.25	5.83	4.84
ANUAL	4.11	5.59	4.85	4.09	5.62	4.88
MAPA						
2009	4.12	5.81	4.97	4.09	5.85	5.04
2010	3.19	5.64	4.42	3.14	5.67	4.73
2011	3.78	5.46	4.62	3.87	5.49	4.74
2012	4.18	5.82	5.00	4.30	5.85	4.99
2013	3.49	5.46	4.48	3.46	5.49	4.65
2014	3.84	5.56	4.70	3.82	5.59	4.92
2015	4.17	5.85	5.01	4.25	5.89	4.99
2016	4.13	5.61	4.87	4.11	5.65	4.83
2017	4.16	5.31	4.73	4.21	5.42	4.89
2018	4.10	5.36	4.73	4.09	5.41	4.89

4.1.2.3- VALIDACIÓN DE LA INTERPOLACIÓN.

Para verificar la calidad del mapa interpolado debe utilizarse un conjunto de validación formado por una serie de puntos de muestreo de los que se conoce el valor real de radiación. Por ejemplo, si el estudio cuenta con 35 puntos de muestreo, el mapa interpolado debe de generarse solamente con 20 puntos, los 15 puntos restantes serán el conjunto de validación, con el resultado del mapa interpolado se compara el valor estimado con el real en cada uno de los 15 puntos de validación. La diferencia entre el valor medido y el estimado es el error de estimación en ese punto. De este modo a cada punto de validación se le asigna un error. El conjunto de los errores debe tener las siguientes características:

- La media de los errores y la media de los errores al cuadrado debe ser aproximadamente cero
- Los valores de error deben ser independientes de su localización en el espacio y no deben estar auto correlacionados
- La función de distribución de los errores debe aproximarse a la distribución normal

El problema es que en este estudio se dispone de pocos puntos de muestreo, por lo que no resulta conveniente reservar algunos de ellos como puntos de validación, la alternativa es el procedimiento de validación cruzada.

La validación cruzada consiste en la estimación del valor de radiación solar, en cada uno de los puntos de muestreo, aunque sin incluir dicho punto de muestro. De esta manera se conoce para cada punto de muestreo tanto el valor real como el valor estimado de forma que puede llevarse a cabo el análisis estadístico de errores antes mencionado.

Para ejemplificar este procedimiento, se realizará la validación de la interpolación correspondiente al mes de enero.

La Tabla 4-4 muestra los valores de radiación solar del mes de enero en kWh/m² a esta tabla se le agregó dos campos uno la radiación estimada para cada una de las estaciones y el error de estimación.

Tabla 4-4 Radiación solar del mes de enero

EST.	NOMBRE	LON	LAT	RADIACIÓN REAL	RADIACIÓN ESTIMADA	ERROR
A-18	LOS ANDES	-89.64	13.88	3.56		
A-31	PLANES DE MONTECRISTO	-89.36	14.40	5.17		
A-37	SANTA ANA UNICAES	-89.55	13.98	5.43		
B-10	CERRON GRANDE	-88.91	13.94	4.90		
G-03	NUEVA CONCEPCION	-89.29	14.12	5.42		
H-14	LA HACHADURA	-90.09	13.85	5.30		
L-04	SAN ANDRES	-89.41	13.81	4.83		
M-24	SAN MIGUEL UES	-88.16	13.43	4.66		
N-02	LA UNION	-87.81	13.32	5.10		
S-10	ILOPANGO	-89.12	13.69	5.89		

PRIMER PASO:

Como primer paso se generó la interpolación, pero, esta vez en el proceso de generación se omitió la estación A-18, obteniendo el resultado mostrado en la Figura 4-9, con ese resultado se procede a ver el valor de la radiación solar en las coordenadas -89.64, 13.88 (punto amarillo) correspondiente a la ubicación de la estación A-18, este valor es la radiación solar estimada que con los que se completó la Tabla 4-5.

gmt surface enero.csv -Rg-90.31/-87.49/13.145/14.5 -I2.7m -Ggenero.nc -T0.4 -VI

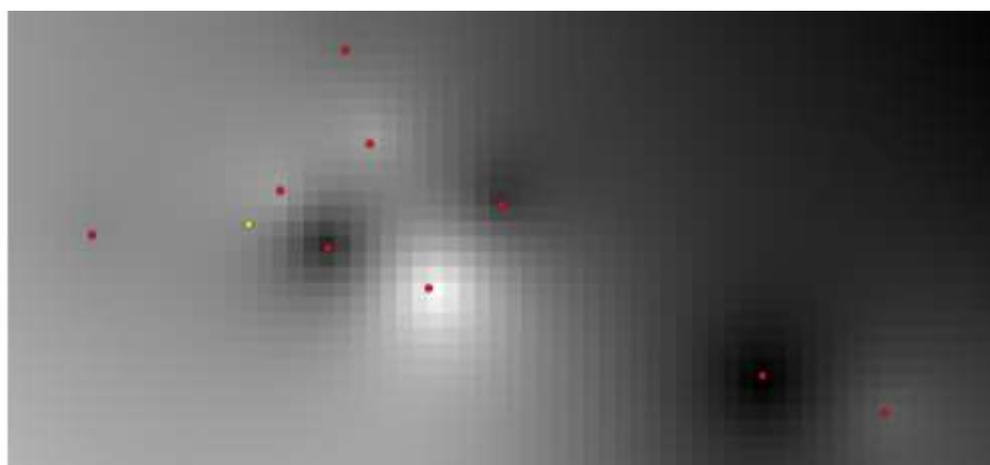


Figura 4-9 Interpolación omitiendo la estación A-18

La Figura 4-10 muestra la interpolación estimada, esta vez involucrando la estación A-18 pero omitiendo la estación A-31, este proceso se realizó hasta encontrar el valor estimado de cada una de las estaciones, donde la interpolación se realizó con todas las estaciones involucradas menos la estación de interés.

gmt surface enero.csv -Rg-90.31/-87.49/13.145/14.5 -I2.7m -GGenero.nc -T0.4 -VI

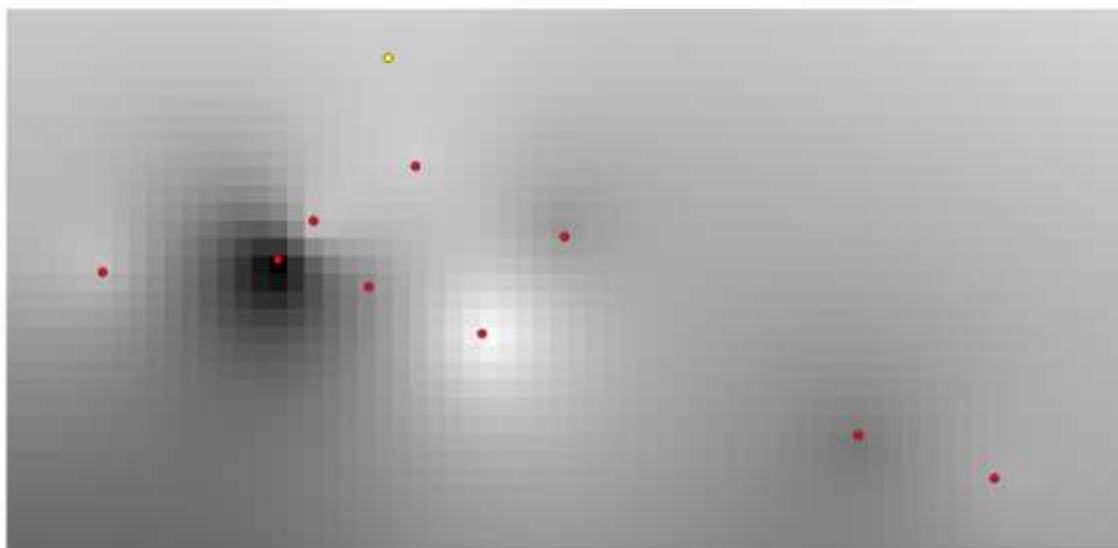


Figura 4-10 Interpolación omitiendo la estación A-31

Luego de realizar las 10 interpolaciones donde se dejó fuera la estación de interés se completó la Tabla 4-5.

Tabla 4-5 Validación de la interpolación del mes de enero

EST.	NOMBRE	LON	LAT	RADIACIÓN REAL	RADIACIÓN ESTIMADA	ERROR
A-18	LOS ANDES	-89.64	13.88	3.56	5.3	49%
A-31	PLANES DE MONTECRISTO	-89.36	14.40	5.17	5.4	4%
A-37	SANTA ANA UNICAES	-89.55	13.98	5.43	4.32	20%
B-10	CERRON GRANDE	-88.91	13.94	4.90	5.48	12%
G-03	NUEVA CONCEPCION	-89.29	14.12	5.42	5.16	5%
H-14	LA HACHADURA	-90.09	13.85	5.30	3.81	28%
L-04	SAN ANDRES	-89.41	13.81	4.83	5.01	4%
M-24	SAN MIGUEL UES	-88.16	13.43	4.66	5.18	11%
N-02	LA UNION	-87.81	13.32	5.10	4.66	9%
S-10	ILOPANGO	-89.12	13.69	5.89	4.69	20%
PROMEDIO				5.026	4.901	16%

La interpolación del mes de enero presenta un error del 16%, este mismo procedimiento se siguió para encontrar el valor estimado de cada punto de muestreo y calcular a su vez el error de estimación, estos datos se presentan a continuación, en las siguientes tablas.

Tabla 4-6 Error de estimación para los mapas mensuales y el anual.

EST.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
A-18	49%	25%	13%	23%	27%	25%	18%	16%	32%	29%	41%	58%	24%
A-31	4%	4%	11%	37%	38%	42%	23%	26%	50%	29%	5%	4%	23%
A-37	20%	4%	8%	10%	10%	12%	13%	13%	12%	8%	6%	7%	10%
B-10	12%	12%	7%	1%	1%	0%	5%	4%	1%	4%	16%	15%	6%
G-03	5%	6%	7%	16%	15%	16%	10%	11%	19%	14%	8%	8%	12%
H-14	28%	9%	9%	10%	10%	12%	15%	16%	12%	8%	10%	7%	11%
L-04	4%	11%	14%	13%	14%	16%	15%	15%	16%	13%	15%	18%	16%
M-24	11%	13%	9%	13%	14%	13%	15%	12%	9%	12%	11%	13%	13%
N-02	9%	11%	7%	11%	11%	10%	13%	10%	6%	8%	8%	12%	10%
S-10	20%	17%	14%	9%	9%	9%	12%	12%	8%	14%	21%	20%	14%
PROMEDIO	16%	11%	10%	14%	15%	16%	14%	14%	16%	14%	14%	16%	14%

Tabla 4-7 Error de estimación para los mapas de promedios anuales.

EST.	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
A-18	31%	60%	27%	22%	45%	38%	16%	21%	23%	22%
A-31	19%	44%	34%	22%	41%	12%	24%	15%	30%	18%
A-37	17%	24%	17%	16%	23%	20%	17%	14%	18%	15%
B-10	12%	6%	6%	9%	8%	10%	10%	8%	3%	8%
G-03	11%	18%	15%	12%	17%	7%	10%	8%	13%	10%
H-14	13%	31%	13%	10%	21%	21%	0%	9%	13%	12%
L-04	3%	3%	8%	10%	7%	5%	15%	8%	8%	7%
M-24	10%	14%	12%	11%	8%	12%	15%	12%	12%	13%
N-02	9%	9%	8%	9%	4%	10%	11%	8%	4%	4%
S-10	16%	17%	15%	17%	16%	16%	19%	18%	6%	6%
PROMEDIO	14%	23%	16%	14%	19%	15%	14%	12%	13%	12%

Destacando brevemente algunos datos de las tablas anteriores se puede ver que el error más bajo corresponde al mapa de marzo que cuenta con un error del 10% mientras que el mayor error corresponde al mapa del año 2010 que tiene un error del 23%.

Para validar la interpolación cada uno de los mapas generados deben de cumplirse los siguientes criterios:

- La media de los errores y la media de los errores al cuadrado debe ser aproximadamente cero, con referencia a los datos de la Tabla 4-6 y la Tabla 4-7 el mayor error es de 0.23 y la media del error al cuadrado es de 0.0529. Estos resultados son aceptables, idealmente se esperaban errores abajo de 0.10, pero esto no fue posible ya que este estudio cuenta con muy pocos puntos de muestra esto hace que el error incremente considerablemente, pero el error de 0.23 es bastante aceptable y continuaremos con estos resultados para la generación de los mapas.
- Los valores de error deben ser independientes de su localización en el espacio y no deben estar auto correlacionados:

Para poder cumplir esta condición es necesario observar la Tabla 4-8.

Tabla 4-8 Error promedio por estación

EST.	ERROR PROMEDIO
A-18	30%
A-31	24%
A-37	14%
B-10	7%
G-03	12%
H-14	13%
L-04	11%
M-24	12%
N-02	9%
S-10	14%
CH14	10%
SV1	4%
FMOG	3%
FIA	1%

El error debería de ser independiente de la posición donde se calcule, pero al observar la tabla anterior se puede notar que no, el error presente en las interpolaciones de este estudio varía principalmente en las estaciones A-18 y A.31, por tanto el error no es completamente independiente la posición, aunque para la mayoría de las estaciones el error sufre unas leves

variaciones por tanto podemos decir que si existe autocorrelación espacial en el error de las interpolaciones, pero, este es relativamente bajo.

- La función de distribución de los errores debe aproximarse a la distribución normal.

La distribución de los errores es aproximadamente igual a la distribución normal la Figura 4-11 muestra la forma de distribución para enero, febrero y marzo.

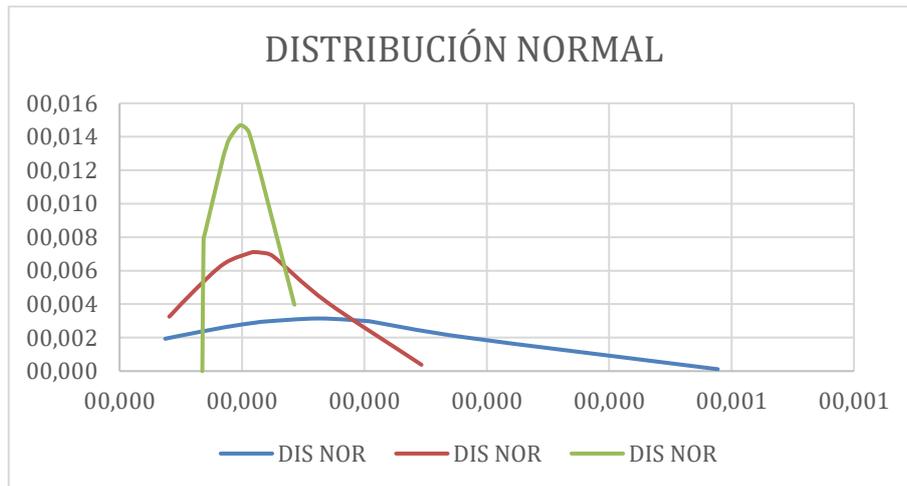


Figura 4-11 Distribución de enero, febrero y marzo.

Con referencia a los tres puntos anteriores los resultados de las interpolaciones, no son los deseados y sus errores no son los ideales, pero luego de hacer todos los ajustes y consideraciones necesarias en el tratamiento y filtrados de los datos, así como usar la interpolación que más se ajusta a las necesidades del proyecto, se decidió que los resultados eran aceptables y se continuo con la creación de los mapas.

4.1.3- CREACIÓN Y EDICIÓN DE LOS MAPAS.

A continuación, se describen los pasos y consideraciones que se tuvieron para crear los mapas de radiación solar de El Salvador.

4.1.3.1- CONFIGURACIÓN DE QGIS

GEORREFERENCIA.

Una de las primeras consideraciones que se tuvieron al momento de crear los mapas, fue asignarle al proyecto el sistema de coordenadas con el que se trabajaría. Para ello en la barra de herramientas abrimos proyecto y en propiedades del proyecto, seleccionamos SRC y seleccionamos el sistema de coordenadas EPSG:4326.



Figura 4-12 Georreferenciación del proyecto.

PANEL DE NAVEGACIÓN.

El panel de navegación brinda la dirección donde se encuentran todas las carpetas que contienen todos los archivos necesarios para la creación del mapa.

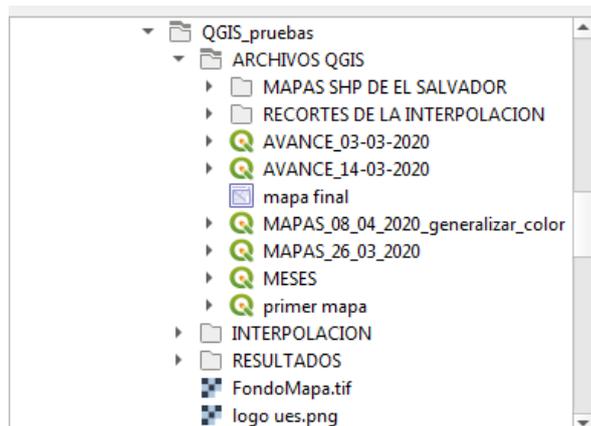


Figura 4-13 Barra de navegación.

PANEL DE CAPAS

El panel de capas es entre todos los paneles el más utilizado ya que en él se administran las diversas capas que contiene el proyecto. La siguiente figura muestra las principales capas que contiene el mapa de enero.

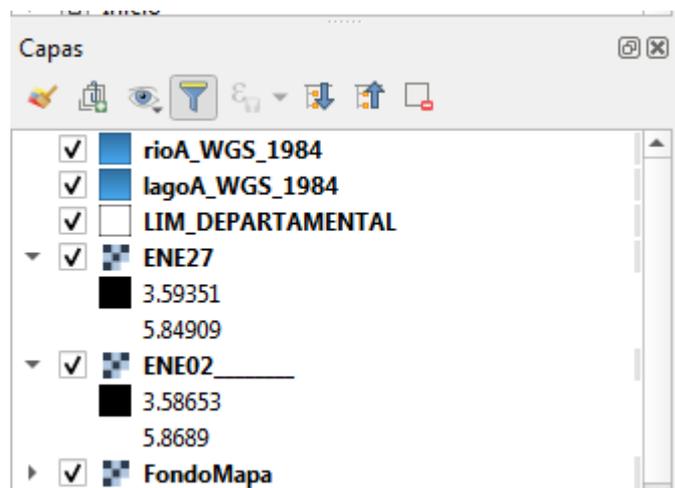


Figura 4-14 Panel de capas.

Estas son las principales configuraciones que hay que tener en cuenta, ya que de ello depende que el proyecto esté bien organizado y que las capas sean administradas de una forma correcta.

4.1.3.2- ANALIZANDO LA INTERPOLACIÓN EN QGIS

Los archivos .nc generados con GMT son compatibles con la gran variedad de formatos que admite QGIS, por lo que basta con llevar estos archivos a la carpeta

del proyecto y desde el panel de navegación arrastrar el archivo hasta el panel de capas.

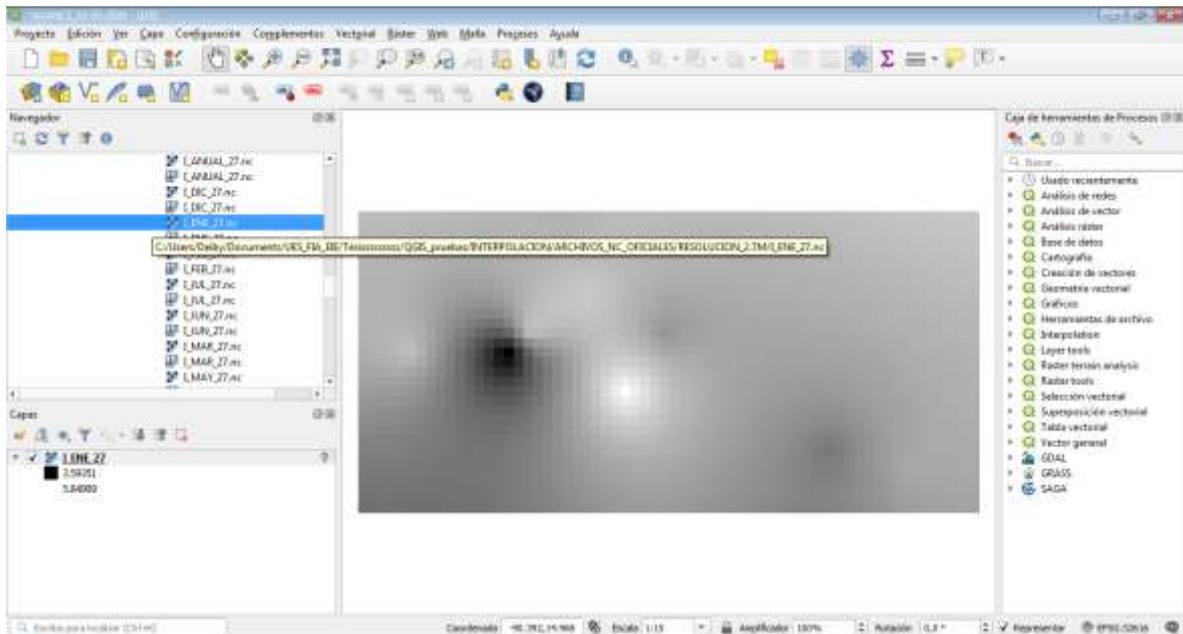


Figura 4-15 Interpolación de enero en QGIS

Por defecto los archivos se colorean con una paleta en blanco y negro mono banda, donde el color negro representa el valor mínimo de la interpolación y el color blanco es el valor máximo de la interpolación.

Al hacer doble click sobre la capa de ENE_27 se abre una ventana de dialogo donde muestra las propiedades de la capa, en la opción de simbología se encuentran todas las opciones para realizar modificaciones a gusto del diseñador.

El tipo de renderizado usado para los mapas fue pseudocolor monobanda, se seleccionó la rampa de colores que muestra la Figura 4-16 y el resultado se muestra en la Figura 4-17.

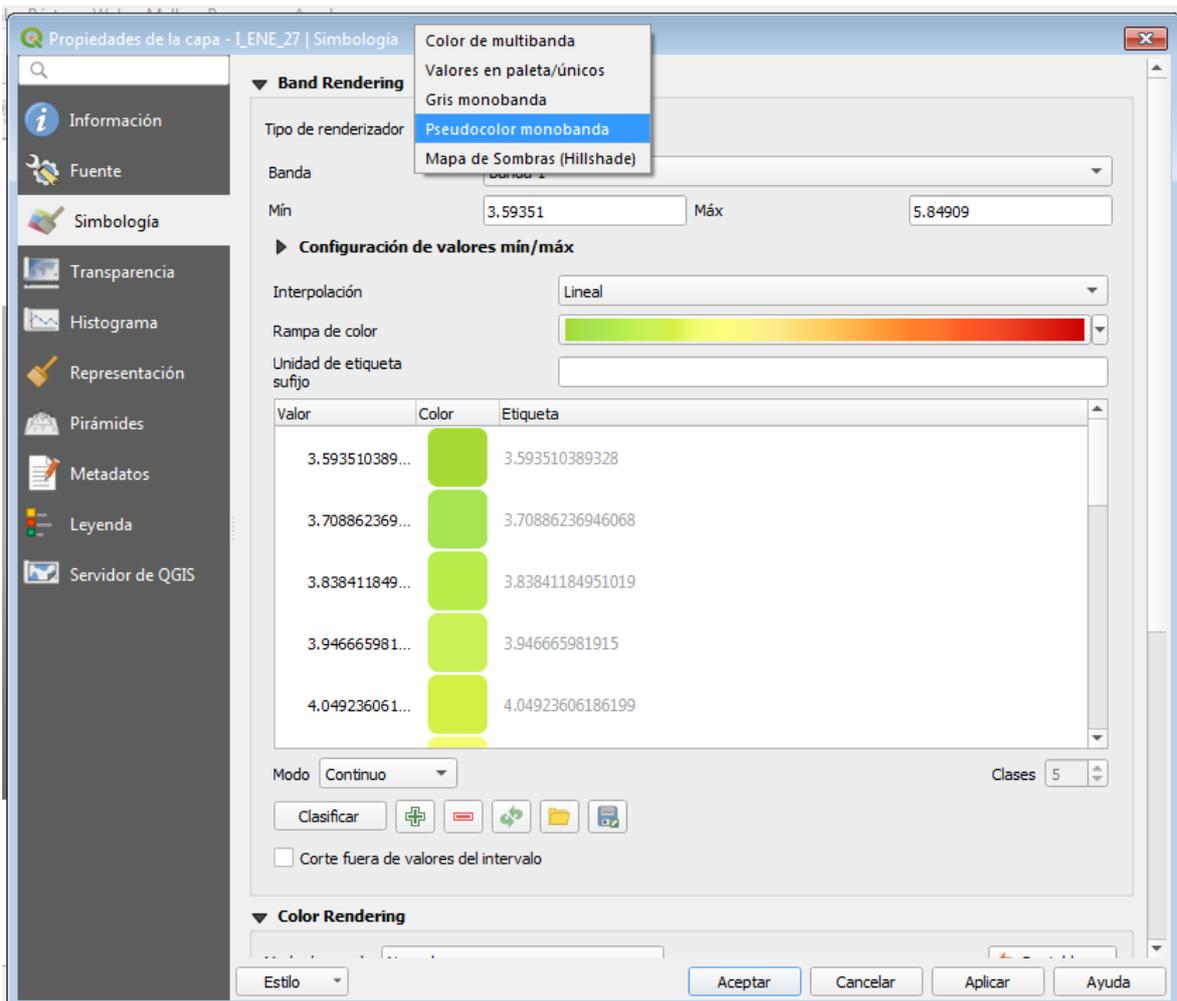


Figura 4-16 Selección de la rampa de color.

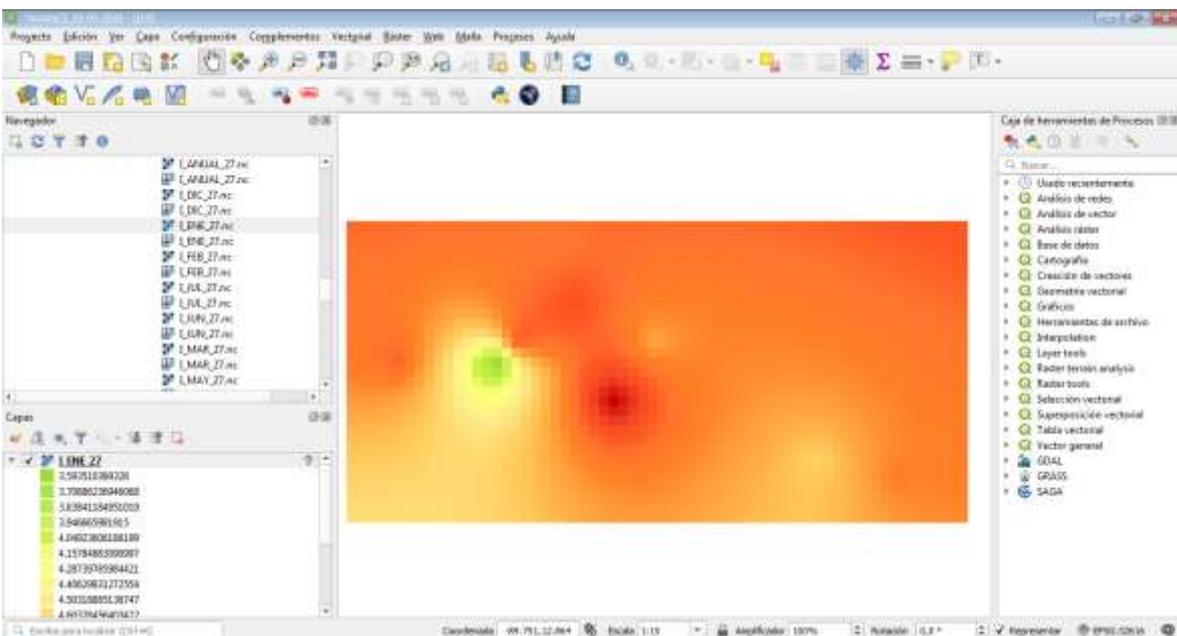


Figura 4-17 Resultado del cambio de color.

4.1.3.3- EDICIÓN DE LOS MAPAS

Continuando con la creación y edición del mapa de enero como ejemplo, es necesario tomar en cuenta las principales capas que debe tener el proyecto.

La capa de mayor importancia como es de esperar es la que contiene la información de interpolación, pero esta capa como tal necesita ser editada para tener un diseño más atractivo. Primero es necesario contar con una capa que muestre los límites geográficos, el Geoportal del Centro Nacional de Registros en su sitio web tiene a la disposición los archivos .shp que contienen información como límites cantonales, departamentales, municipales, ríos principales y secundarios, lagos, etc.

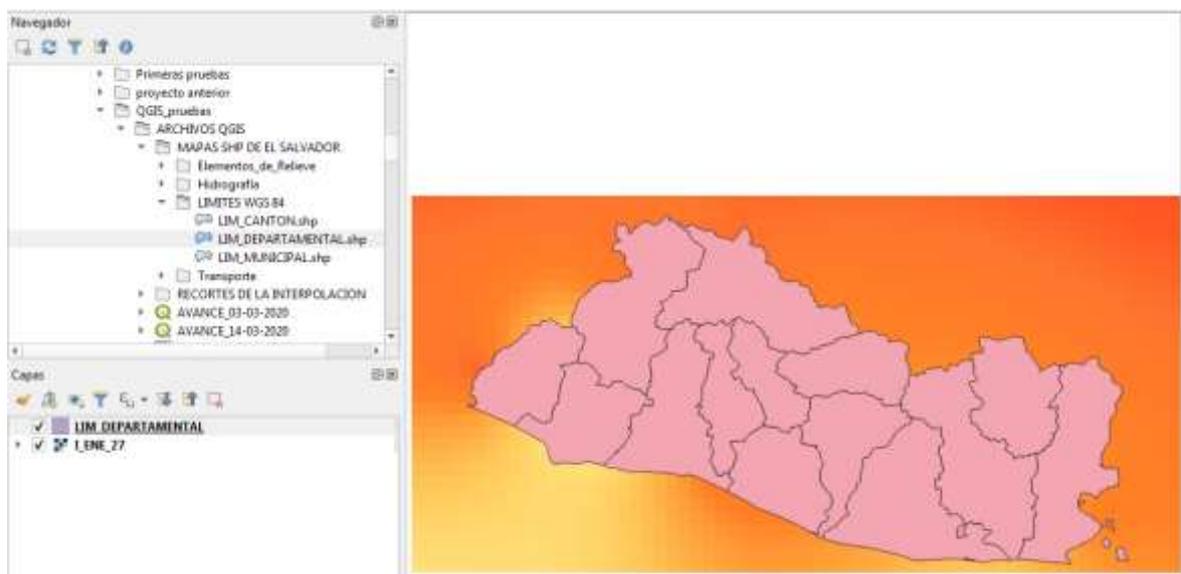


Figura 4-18 Agregando límites a la interpolación.

Al agregar los límites departamentales a la capa de interpolación es notorio como esta capa se sale de nuestra zona de interés que es El Salvador, para solventar eso, es necesario recortar la capa de interpolación; en la barra de herramientas, abrimos la opción Ráster >> Extracción >> Cortar ráster por capa de máscara. Seleccionamos la capa de entrada a la interpolación y la capa de máscara será la capa que contiene los límites departamentales, luego de recortar la capa y agregarla al panel de capas, abrimos las propiedades de la capa de los límites departamentales y cambiamos el tipo de relleno sólido a un estilo sin relleno, deshabilitamos la capa de interpolación y el resultado se muestra en la siguiente figura.

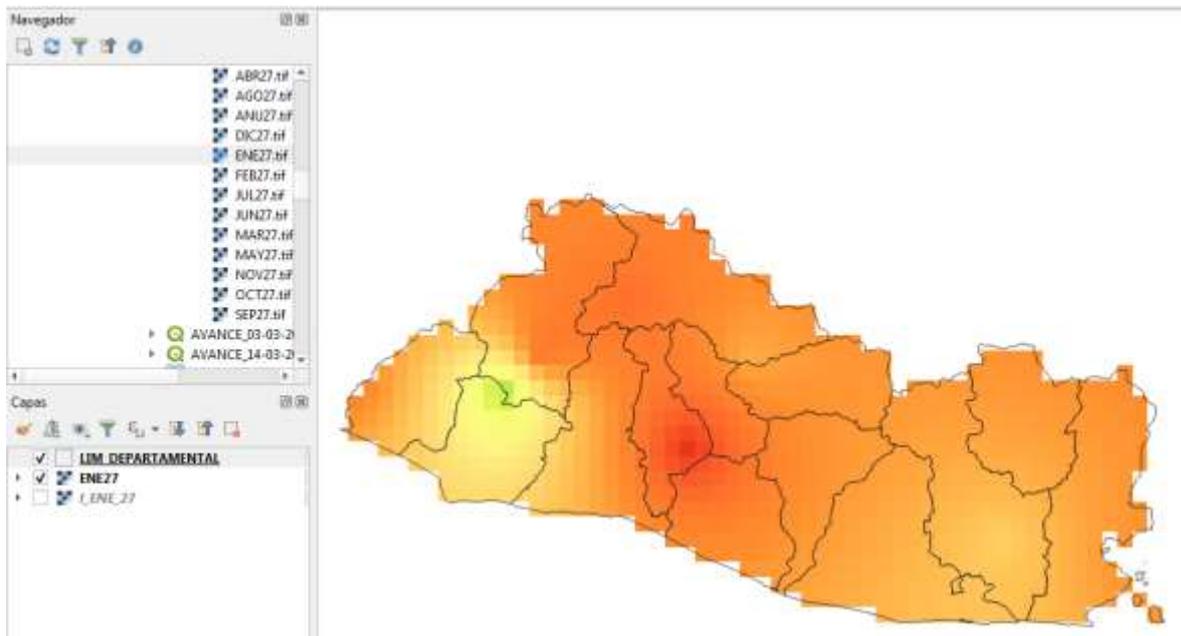


Figura 4-19 Recorte de la interpolación.

En esta parte es notorio como las grillas de la interpolación son demasiado grandes y al efectuar el recorte quedan recuadros en los límites, esto es debido principalmente a que la interpolación se realizó con un ancho de 2.7 minutos de cargo, por tanto, generamos nuevamente la misma interpolación, pero esta vez la grilla es de 0.2 minutos de arcos, realizamos el mismo procedimiento anterior en QGIS y agregamos esta tercera capa por detrás de las primeras dos. El resultado se ve mucho mejor en la Figura 4-20.

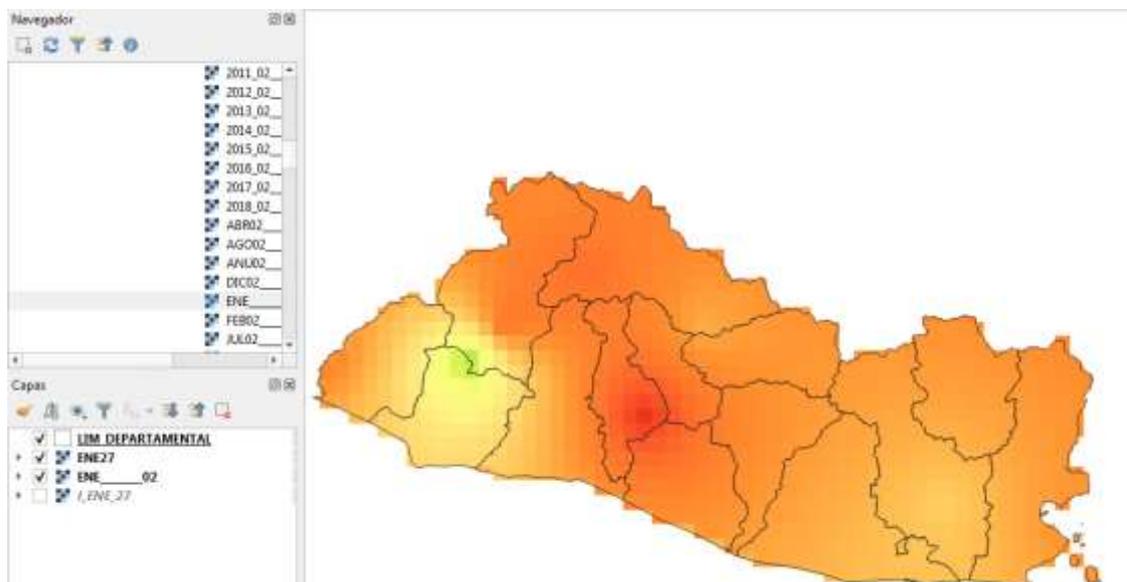


Figura 4-20 Modificación del recorte.

En este punto el objetivo casi esta cumplido, representar gráficamente atreves de colores los niveles de radiación solar sobre el salvador, pero es posible agregar unas capas más para que el resultado sea más agradable.

Agregamos dos capas más correspondientes a los principales ríos y lagos.

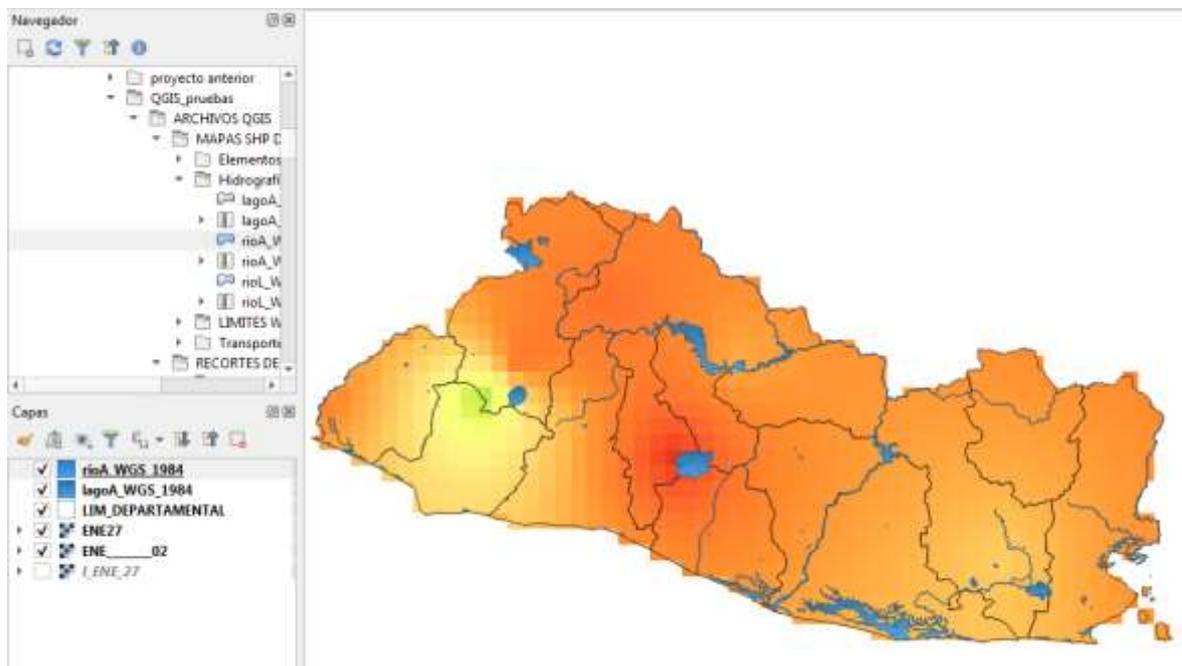


Figura 4-21 Incorporación de la hidrografía.

Mucho mejor por último agregar un fondo, existen distintos tipos de fondo para usar los más comunes suelen ser mapas de elevación digital, pero en nuestro proyecto optamos por agregar una imagen satelital .tif de fondo.



Figura 4-22 Imagen satelital.

Para agregar los elementos que ayudaran a comprender de una mejor manera el mapa, como título, leyendas, grillas, etc. Creamos una nueva composición de impresión.

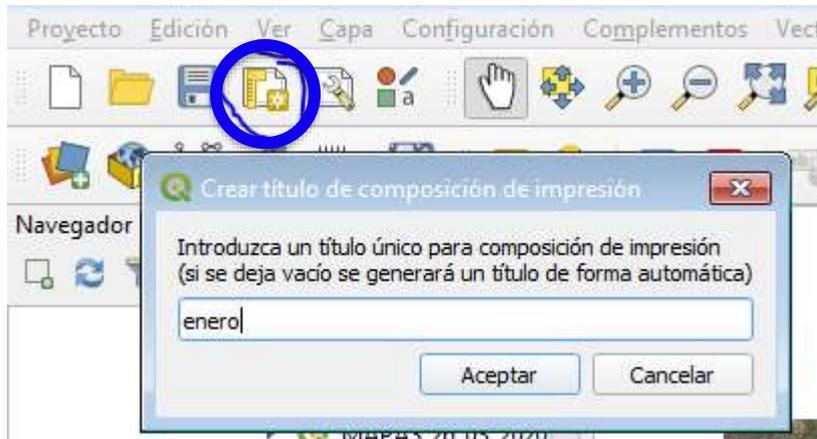


Figura 4-23 Nueva composición de impresión.

Se abrirá una nueva ventana donde tendremos un área de trabajo en blanco, en la Figura 4-24 muestra el membrete y diseño de la hoja de impresión para nuestro proyecto, esta sección es a criterio del diseñador donde agrega el texto y elementos que considere necesario para que el mapa sea fácil de comprender.

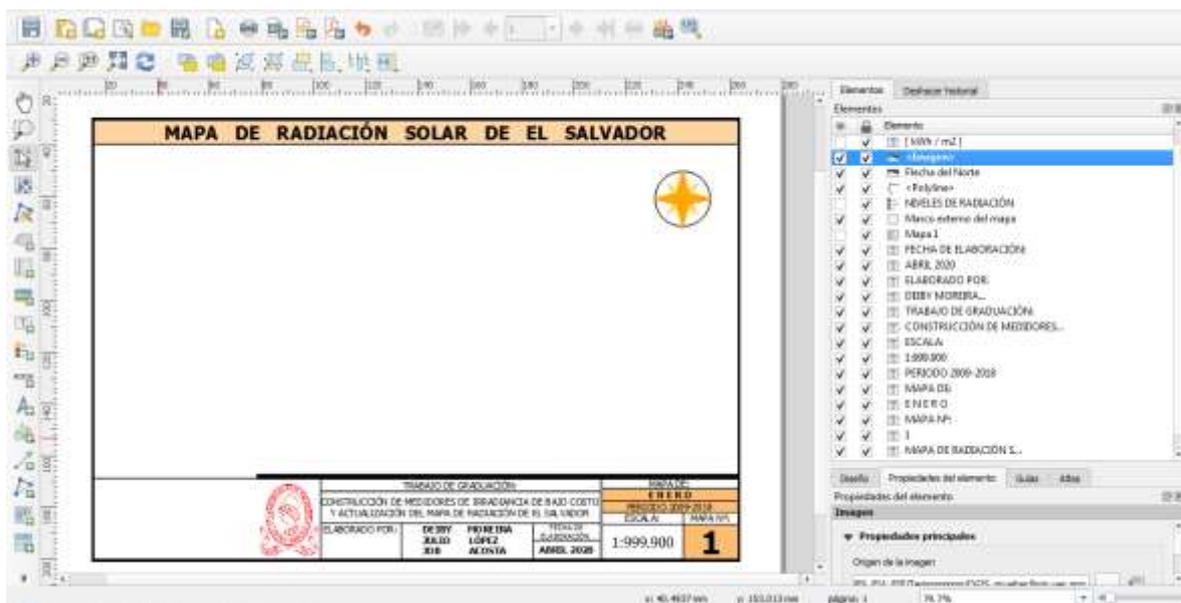


Figura 4-24 Membrete del mapa final.

La columna izquierda muestra una caja de herramientas, al seleccionar insertar mapa, agregamos el mapa del proyecto en la hoja de impresión.

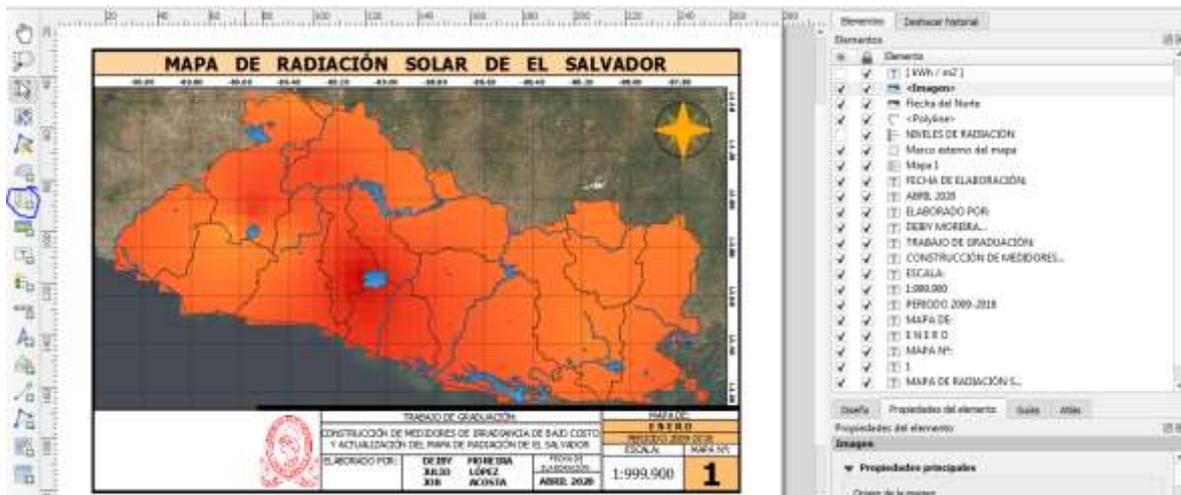


Figura 4-25 Inserción del mapa en la hoja de impresión.

El principal elemento para la correcta interpretación del mapa es la leyenda, ya que ella muestra la información referente a los niveles de radiación solar que representa cada color en el mapa.

Existe un detalle que no es notorio al elaborar únicamente un mapa, pero como en el caso de nuestro proyecto que cuenta con 23 mapas diferentes, este problema salió a la luz, al asignar la rampa de colores a cada una de las capas de interpolación, esta asigna el color verde al valor más pequeño y color rojo al valor más alto, como es de esperarse no todos los mapas tiene los mismos niveles de radiación solar, como ejemplo se muestra la leyenda de los meses de noviembre y diciembre.

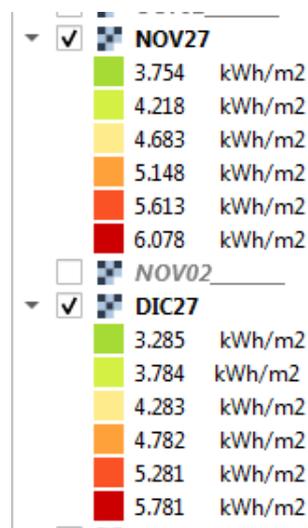


Figura 4-26 Niveles de radiación de noviembre y diciembre.

En la Figura 4-26 se puede observar cómo el mismo color no tiene el mismo significado en cada mapa, es decir, para noviembre el verde intenso tiene un valor de 3.754 kWh/m² mientras que para diciembre tiene un valor de 3.285 kWh/m², para solucionar esto decidimos generalizar la rampa de colores y de esta forma el verde tendría el mismo valor en todos los mapas.

La Figura 4-27 muestra las modificaciones hechas, de la Tabla 4-3 se observó que el menor valor de la interpolación es de 3.19 y el máximo es 6.22, estos valores se sustituyeron en los valores mínimos y máximos de la banda de colores, en promedio el ancho de cada intervalo era 0.30, para obtener un ancho aproximado, dividimos la rampa en 12 intervalos obteniendo un ancho de 0.275, esta misma configuración de estilo se utilizó para todos los mapas.

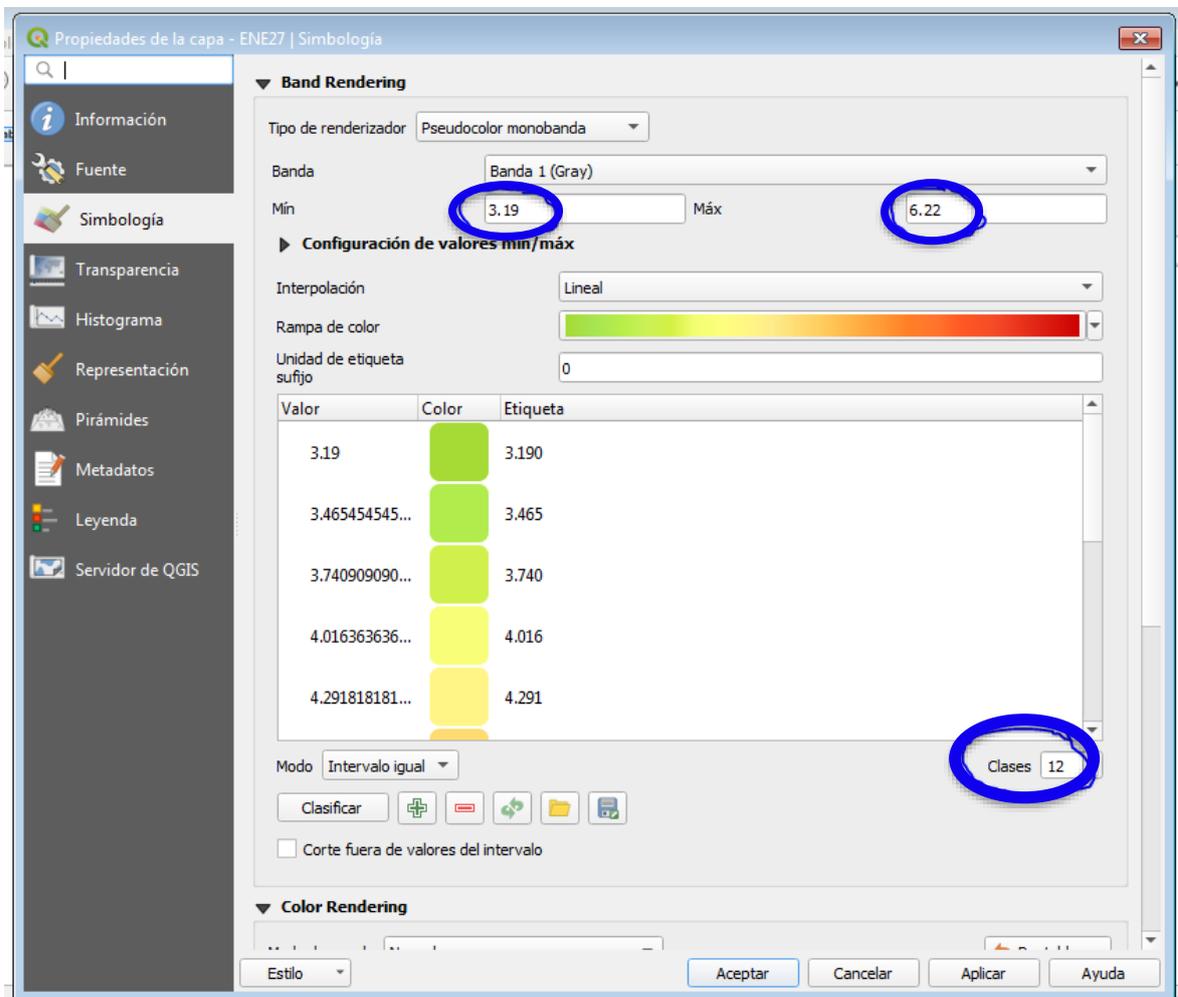


Figura 4-27 Generalizando la rampa de colores.

El resultado de la rampa de colores generalizadas se muestra en la Figura 4-28, además este es el mapa resultante para este proyecto.

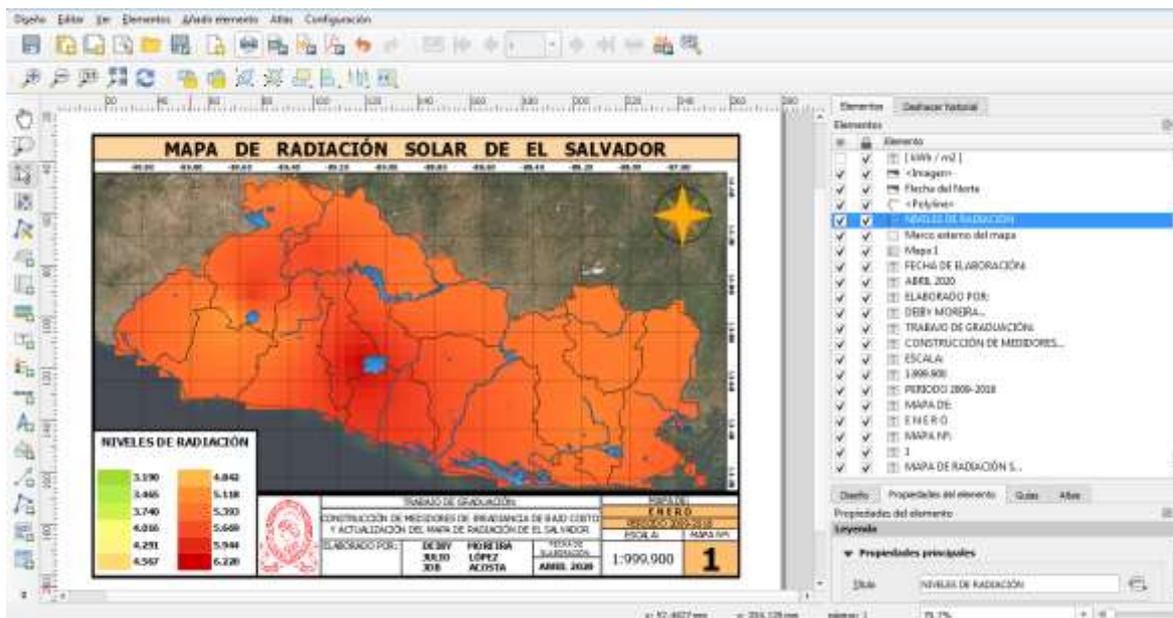


Figura 4-28 Resultado de la edición del mapa.

4.2- GUÍA PARA GENERACIÓN DE UN MAPA.

A continuación, se enlistarán todos los pasos tomados para la elaboración de los mapas que se muestran como resultados finales en la sección 4.3 (MAPAS RESULTANTES), cabe destacar que algunos de los pasos se han detallado ya en secciones anteriores.

1) OBTENCIÓN DE DATOS.

El primer paso para generar el mapa es la obtención de los datos, estos pueden ser: Radiación solar, Horas de luz o Radiación solar instantánea, es preciso contar con la cantidad de datos correspondiente al período que se desea estudiar.

- a) **Generación de datos:** Generalmente los registros de datos contienen huecos, los cuales deben de ser llenados con datos generados a través de algún método de predicción, en la sección 3.4.2 (GENERACIÓN DE DATOS) se describe la predicción usada en este estudio.
- b) **Filtrado de datos:** Los registros de datos inevitablemente tendrán datos erróneos, esto debido a muchos errores presentes en los dispositivos de medición, cortes de energía, etc. Debido a esto es necesario realizarles un

filtrado, esto para eliminar el peso de los datos erróneos y a su vez disminuir el error en la información que se procesara. (sección 3.4.3 FILTRADO DE DATOS).

- c) **Conversión de datos:** Este paso dependerá del tipo de datos con el que se cuente, en nuestro estudio se nos proporcionaron datos de horas de luz solar, por tanto, fue necesario convertir estos datos a radiación solar (sección 3.5 CONVERSIÓN DE [HR] A [SR] USANDO EL ANÁLISIS ANGSTRÖM.), de lo contrario bastara con llevar los datos a promedios mensuales y anuales diario en kWh/m².

2) **INTERPOLACIÓN.**

Para generar el mapa es necesario conocer los niveles de radiación solar de por lo menos cada metro cuadrado del territorio en estudio, pero esto no es posible, por tanto, es necesario interpolar los datos.

En este estudio se utilizó el módulo surface de GMT para realizar la interpolación de los datos la sección 4.1.2.1 (INTERPOLACIÓN USANDO SURFACE GMT) explica cada uno de los pasos a seguir.

3) **VALIDACIÓN DE LA INTERPOLACIÓN.**

Una vez realizada la interpolación el siguiente paso consiste en validar los resultados de esta forma podría optarse por otro método de interpolación si dichos resultados no son satisfactorios, la sección 4.1.2.3 (VALIDACIÓN DE LA INTERPOLACIÓN) detalla el método utilizado en este estudio.

4) **ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE LOS DATOS INTERPOLADOS.**

Con los resultados de la interpolación obtenidos el siguiente paso es analizar los datos en un entorno gráfico.

Para el análisis de datos existen muchas herramientas SIG destinadas especialmente para el geoprocesamiento de datos, como se indicó en las secciones anteriores, en este proyecto se utilizó QGIS un software libre (sección 4.1.3 (CREACIÓN Y EDICIÓN DE LOS MAPAS)).

Como se explicó anteriormente el entorno de trabajo de QGIS consta de capas, entonces para generar un mapa atractivo y fácil de interpretar se deben de considerar los siguientes pasos.

- a) **Seleccionar el sistema de georreferencia.** Esta configuración es de suma importancia ya que si las capas no están en el mismo sistema de referencia las escalas y posiciones de las capas no serán las adecuadas.

- b) **Límites departamentales:** Una capa de principal interés es la que cuenta con la información de límites geográficos, para los mapas de este estudio basto con el archivo SHP de los límites departamentales, ríos y lagos principales.
 - c) **Mapa base:** Esta capa parte de la creatividad del diseñador, puede tratarse de una capa de elevación digital del terreno o como en el caso de nuestros mapas, que incluimos una imagen satelital .tif como mapa de base.
 - d) **Análisis de la interpolación:** Dentro del entorno de QGIS analizamos los archivos .nc generados, estos son procesados, cortándolos en base a los límites departamentales, y asignándoles una rampa de colores.
 - e) **Composición de impresión:** Consiste en editar y agregar todos los elementos necesarios para que la interpretación de los mapas generados sea lo más fácil posible, esta parte es esencialmente a criterio del diseñador.
- 5) **RESULTADOS.**

Una vez completados todos pasos anteriores, se habrán generado los mapas deseados y se procederá a realizar el análisis y conclusión de estos.

4.4- MAPAS RESULTANTES

A continuación, se muestran los 23 mapas resultantes, dividido en dos principales grupos.

Primer grupo consta de 13 mapas correspondientes a un mapa para cada mes y un treceavo mapa que corresponde al mapa de promedio anual, estos trece mapas fueron generados con el promedio de datos de los 10 años de estudio, calculando la mediana diaria para cada mes y luego el promedio de cada mes en los últimos diez años los resultados son los de la Figura 4-29 hasta la Figura 4-40, luego sacando el promedio anual para cada año y finalmente promediando los diez años Figura 4-41.

El segundo grupo corresponde diez mapas generados con los promedios anuales para cada uno de los años de estudio desde el 2009 hasta el 2018 los resultados se muestran en el Anexo E.

Se presenta un mapa por página, así como una breve descripción de datos donde indica el valor mínimo y máximo de radiación solar, el error presente en la interpolación y el nivel de radiación predominante en el territorio salvadoreño (moda).

Mínimo
3.59

Máximo
5.85

Moda
5.05 - 5.10

[KWh/m²]

Error
16%

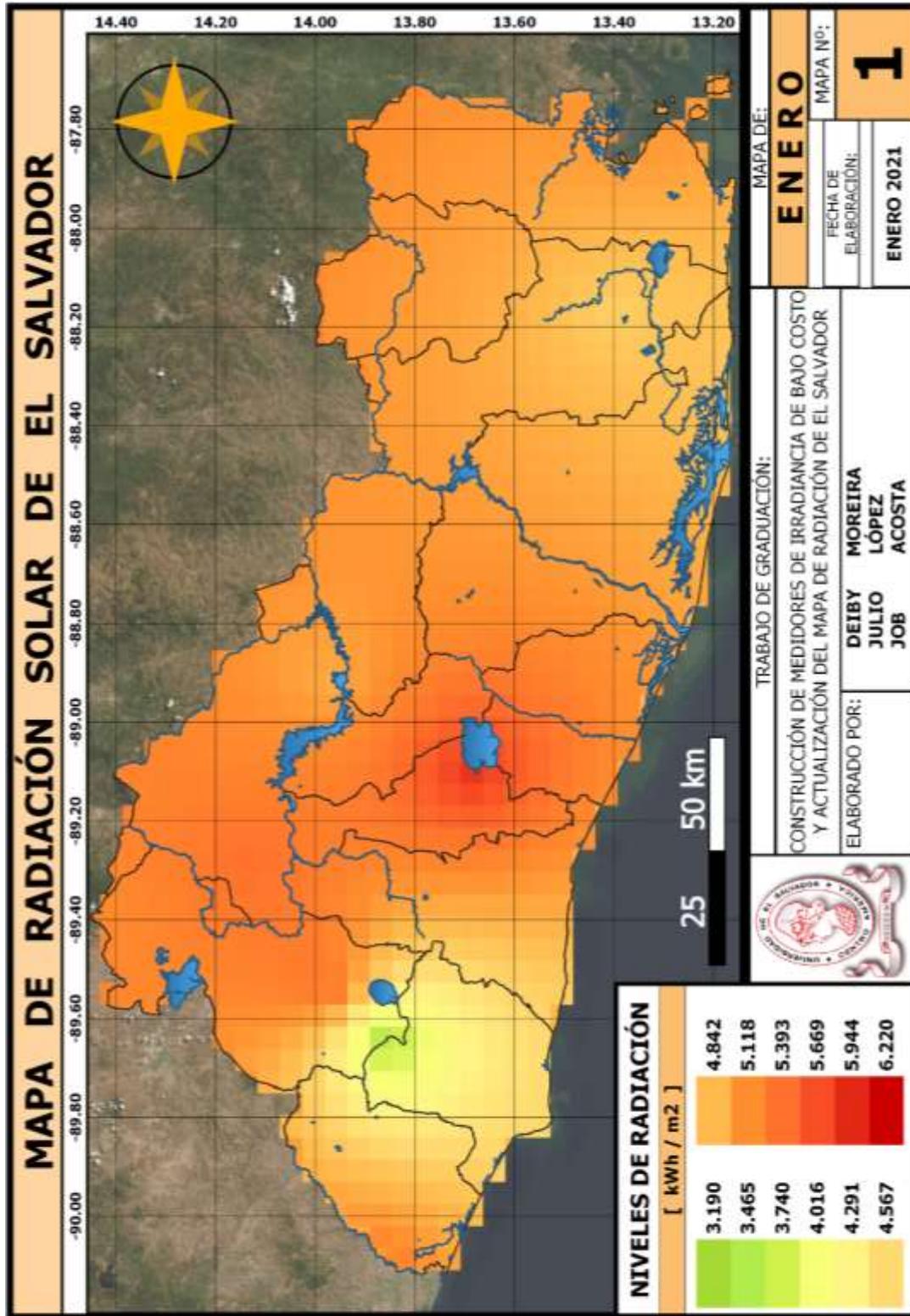


Figura 4-29 Mapa de radiación solar de enero.

Mínimo
4.48

Máximo
6.22

Moda
5.25 – 5.35

[KWh/m²]

Error
11%

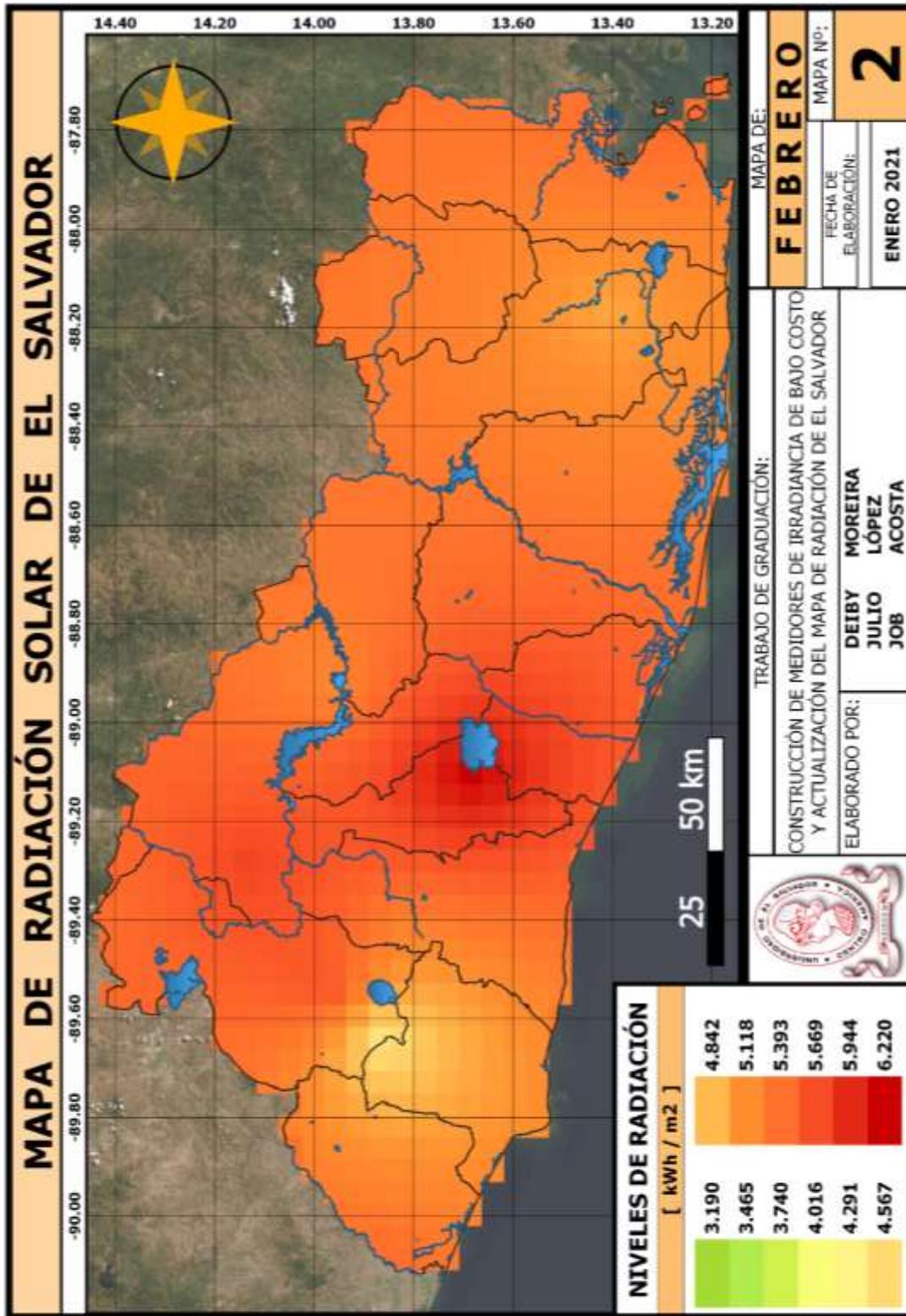


Figura 4-30 Mapa de radiación solar de febrero.

Mínimo
3.88

Máximo
5.49

Moda
4.73 – 5.07

[KWh/m²]

Error
14%

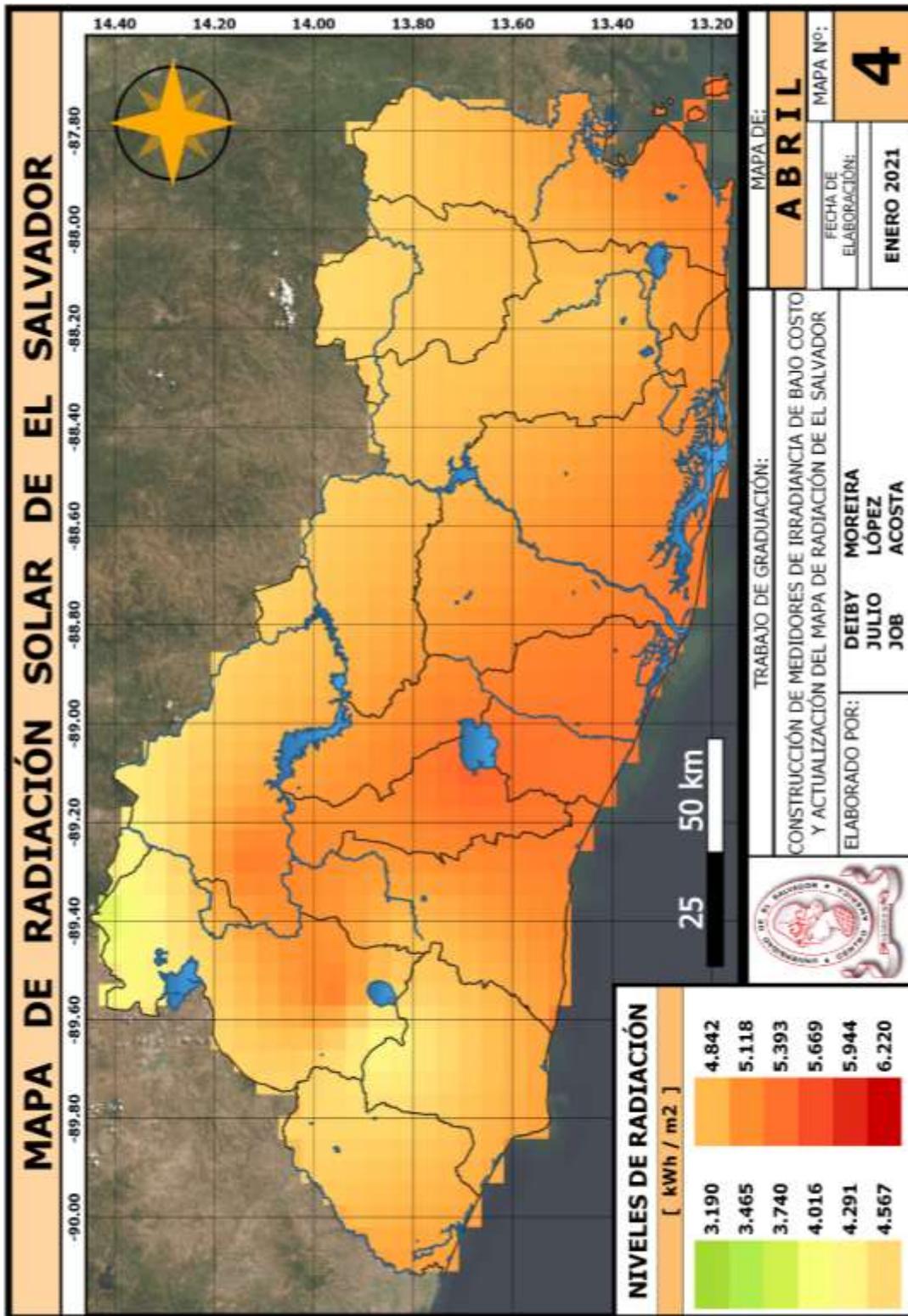


Figura 4-32 Mapa de radiación solar de abril.

Mínimo
3.27

Máximo
4.70

Moda
4.12 – 4.48

[KWh/m²]

Error
16%

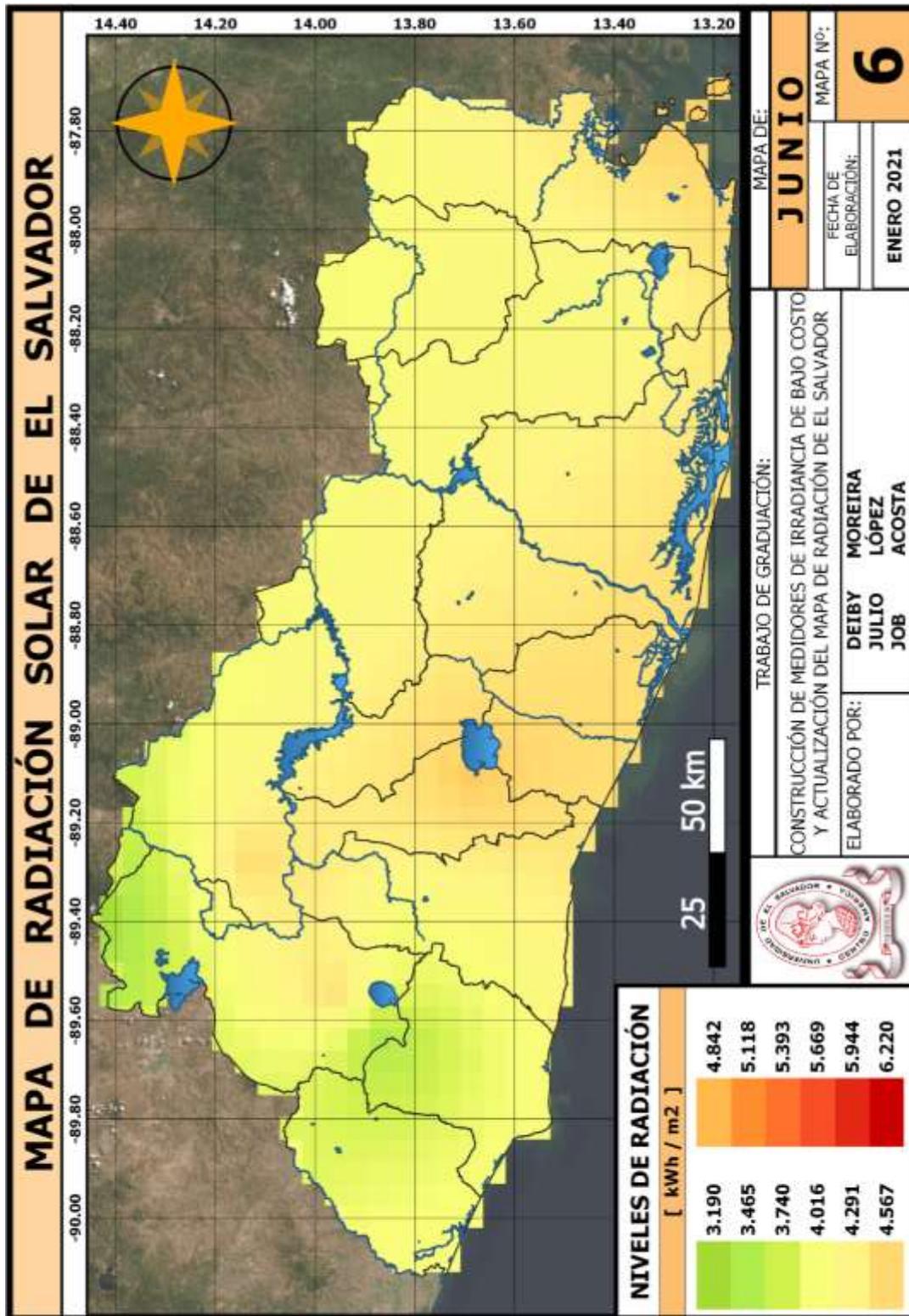


Figura 4-34 Mapa de radiación solar de junio.

Mínimo
4.07

Máximo
5.13

Moda
4.45 – 4.61

[KWh/m²]

Error
14%

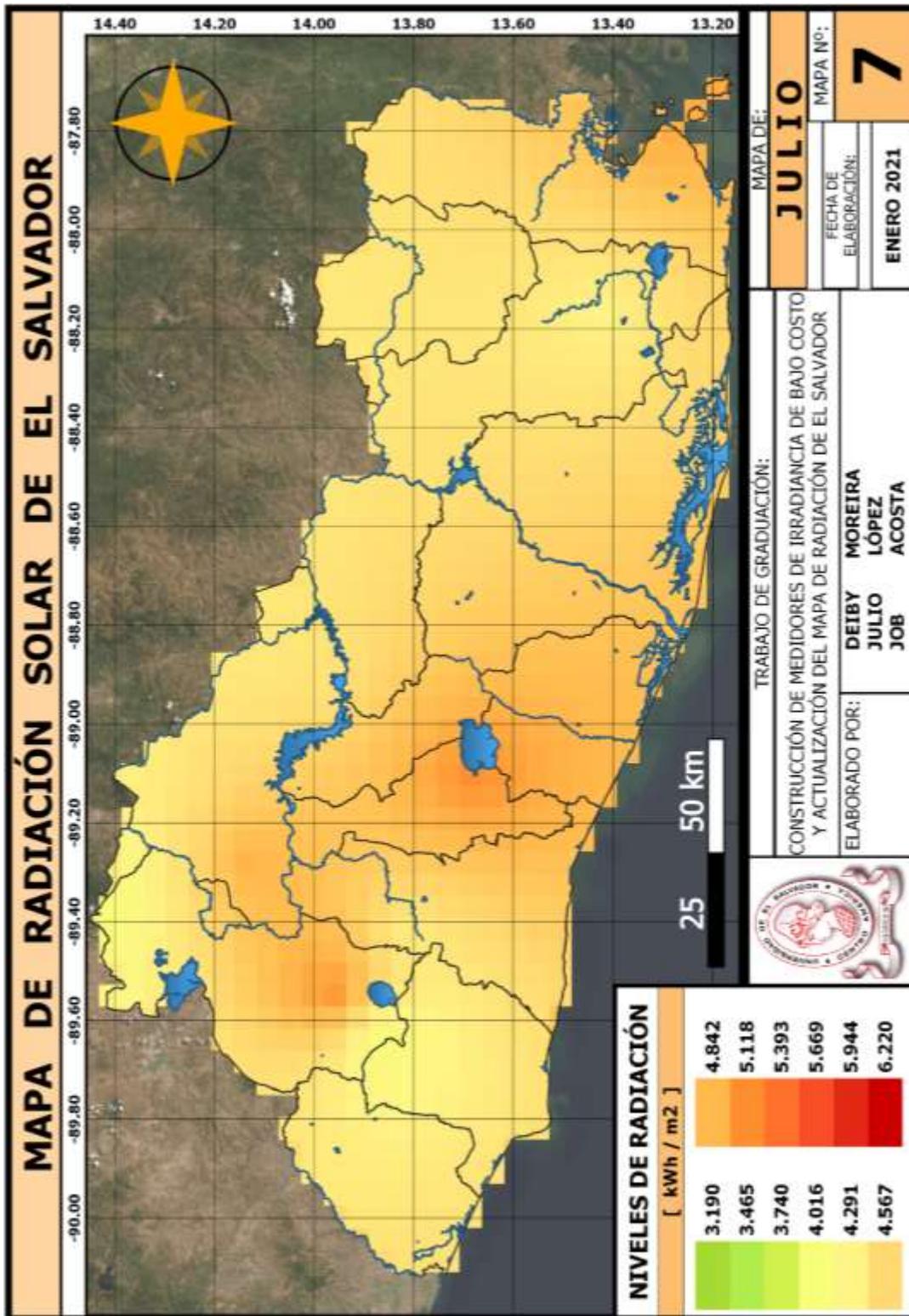


Figura 4-35 Mapa de radiación solar de julio.

Mínimo
4.04

Máximo
5.38

Moda
4.68 – 4.96

[KWh/m²]

Error
14%

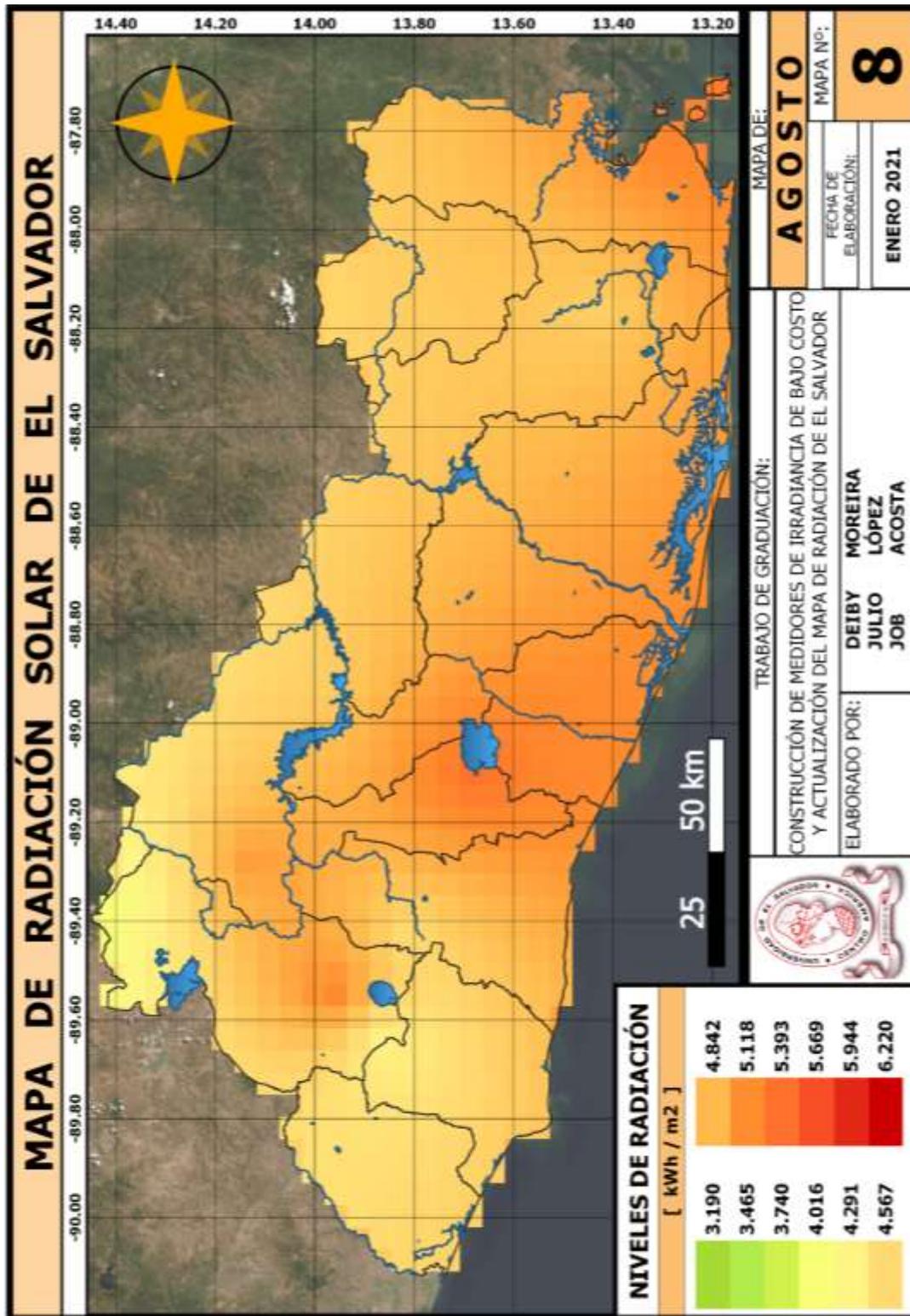


Figura 4-36 Mapa de radiación solar de agosto.

Mínimo
3.44

Máximo
5.31

Moda
4.78 – 4.93

[KWh/m²]

Error
16%

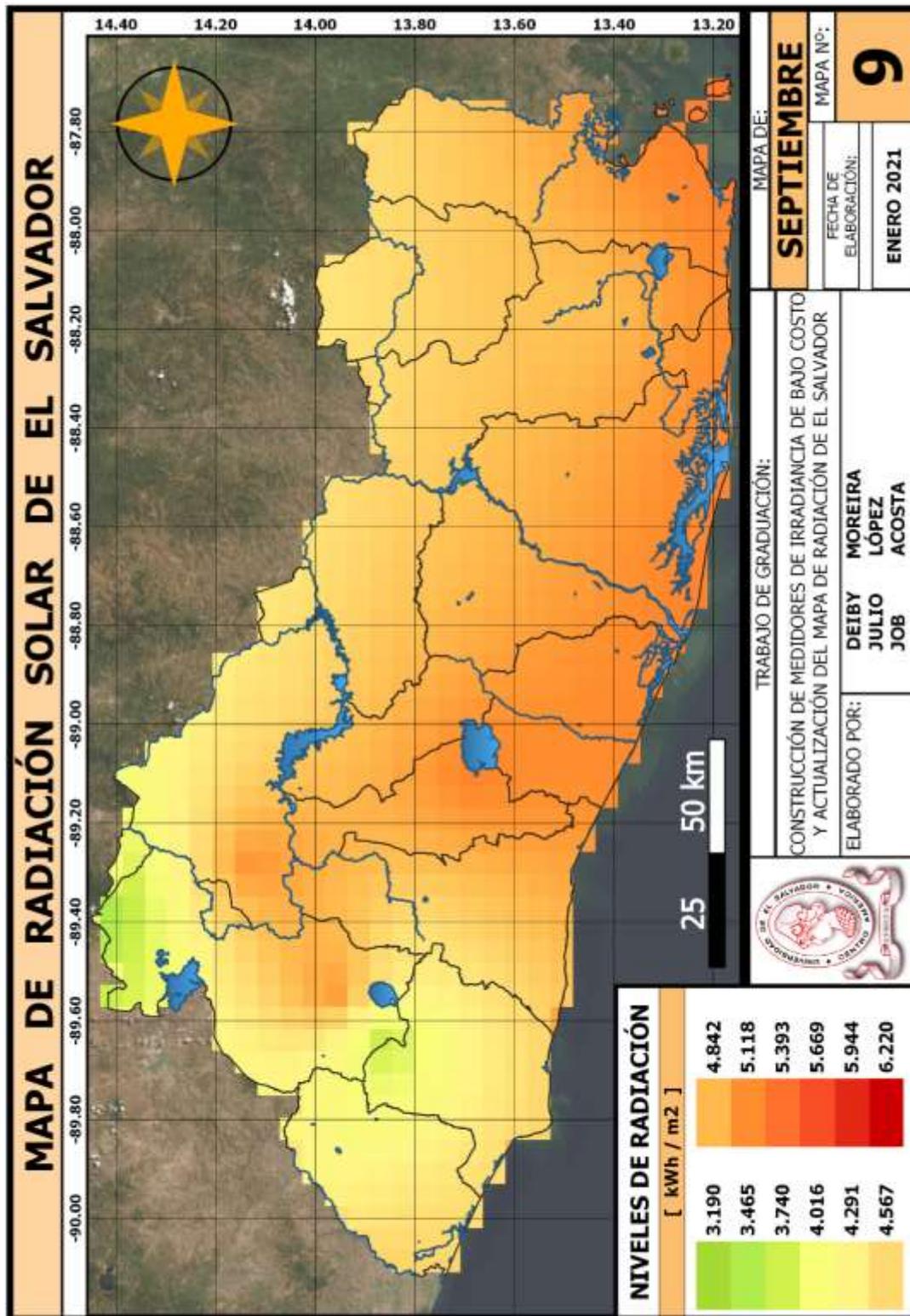


Figura 4-37 Mapa de radiación solar de septiembre.

Mínimo
3.91

Máximo
5.67

Moda
4.81 – 4.91

[KWh/m²]

Error
14%

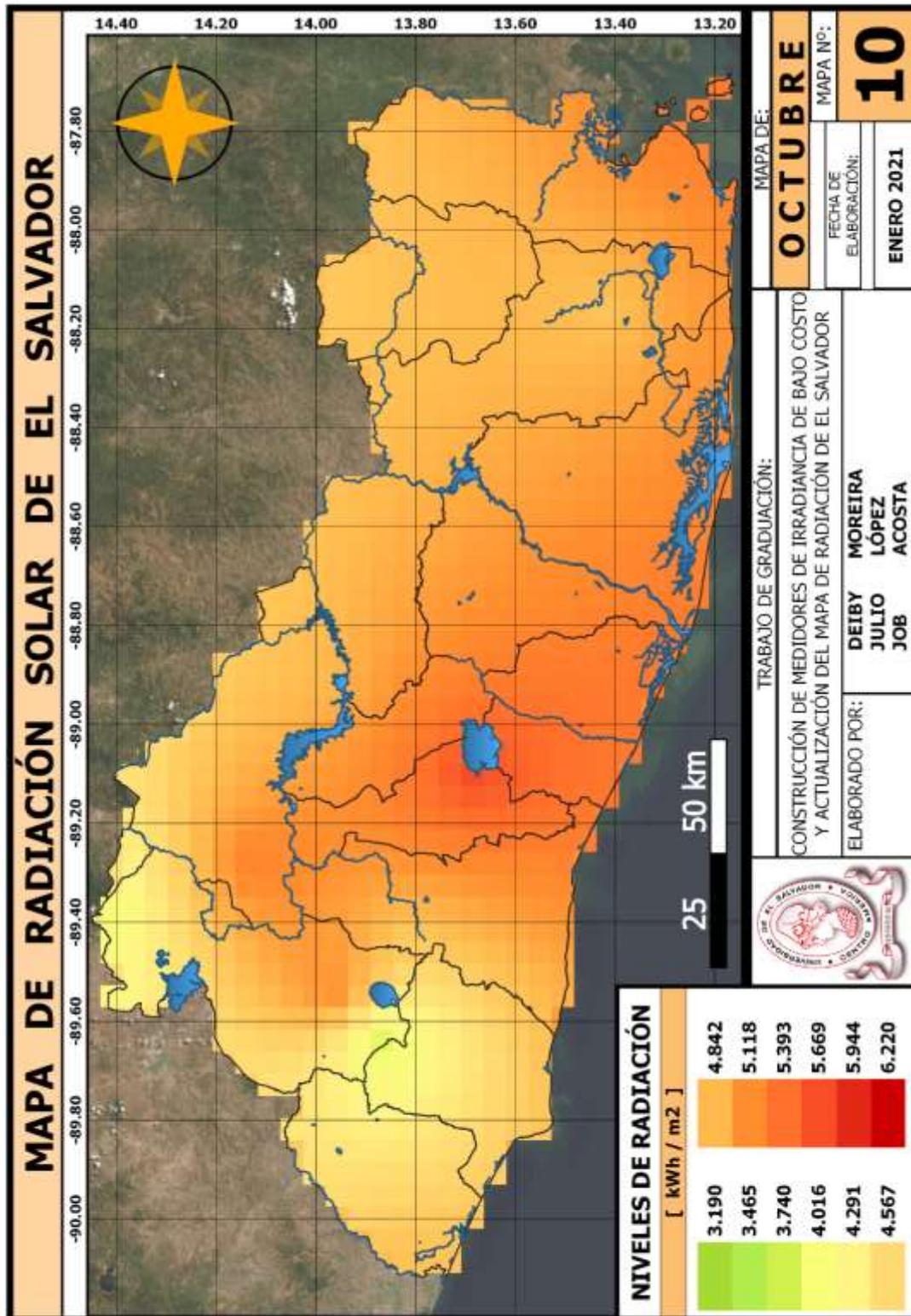


Figura 4-38 Mapa de radiación solar de octubre.

Mínimo
3.75

Máximo
6.08

Moda
4.87 – 4.90

[KWh/m²]

Error
14%

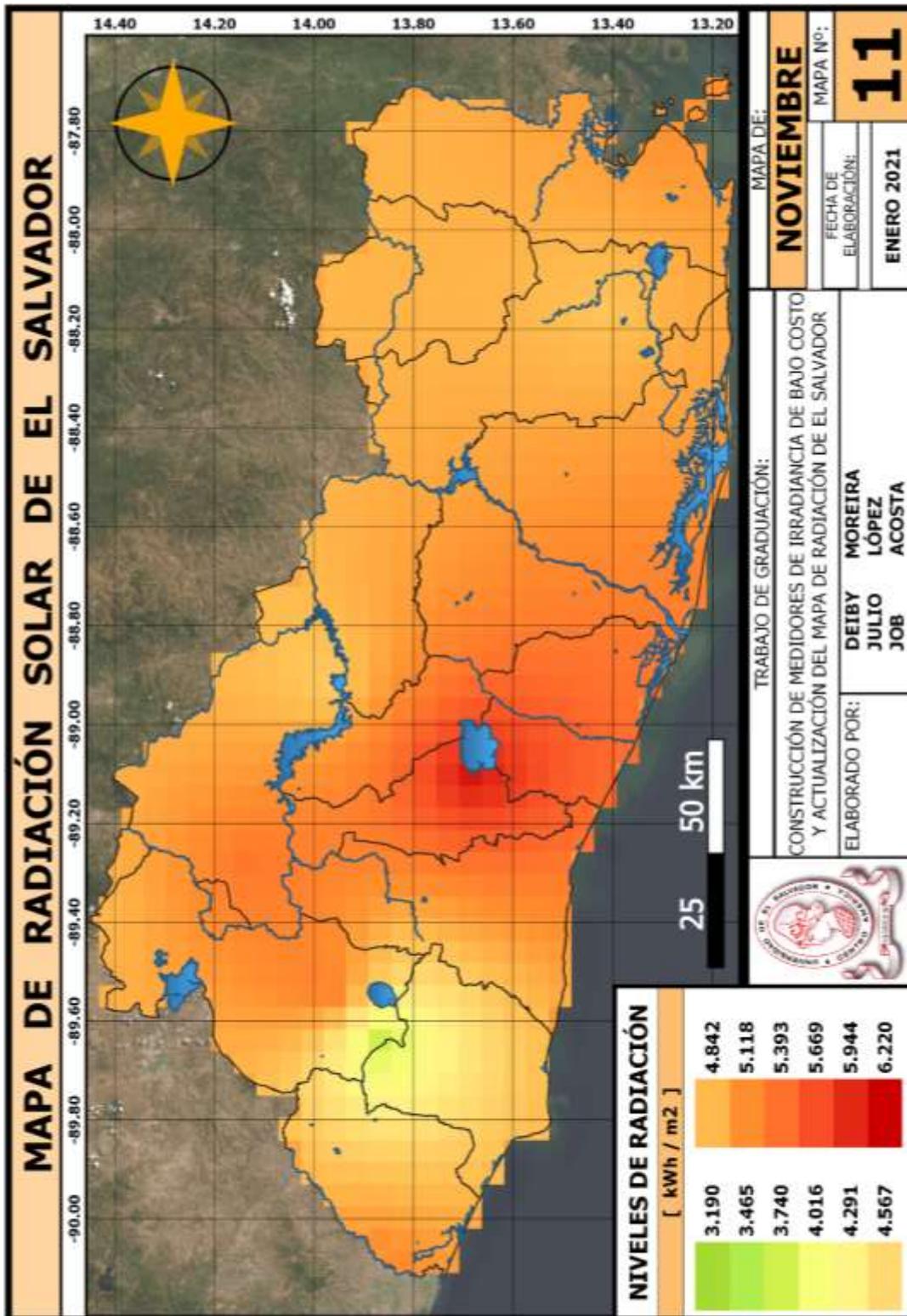


Figura 4-39 Mapa de radiación solar de noviembre.

Mínimo
3.28

Máximo
5.78

Moda
4.82 – 4.92

[KWh/m²]

Error
16%

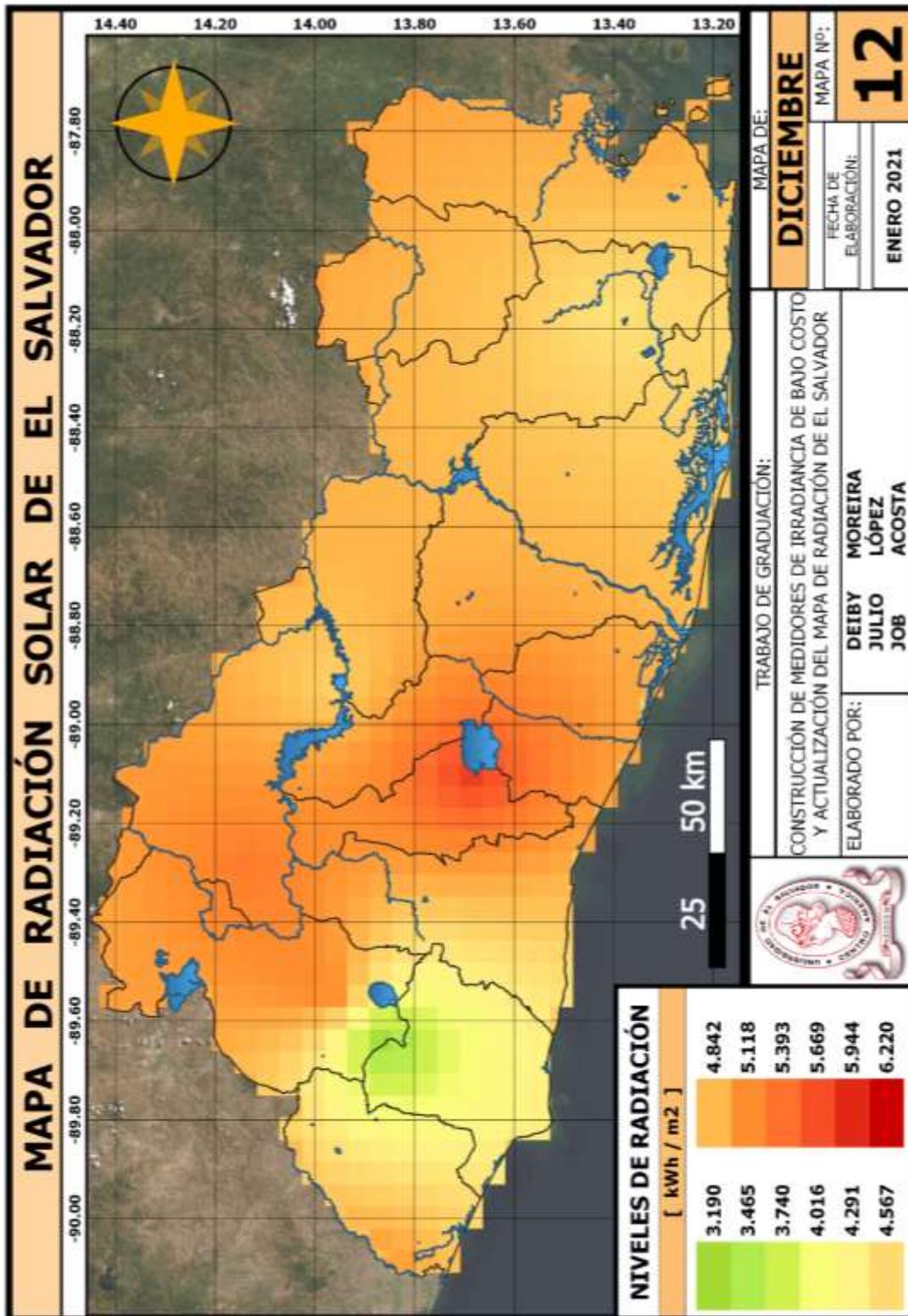


Figura 4-40 Mapa de radiación solar de diciembre.

Mínimo
4.11

Máximo
5.59

Moda
4.75 – 4.80

[KWh/m²]

Error
14%

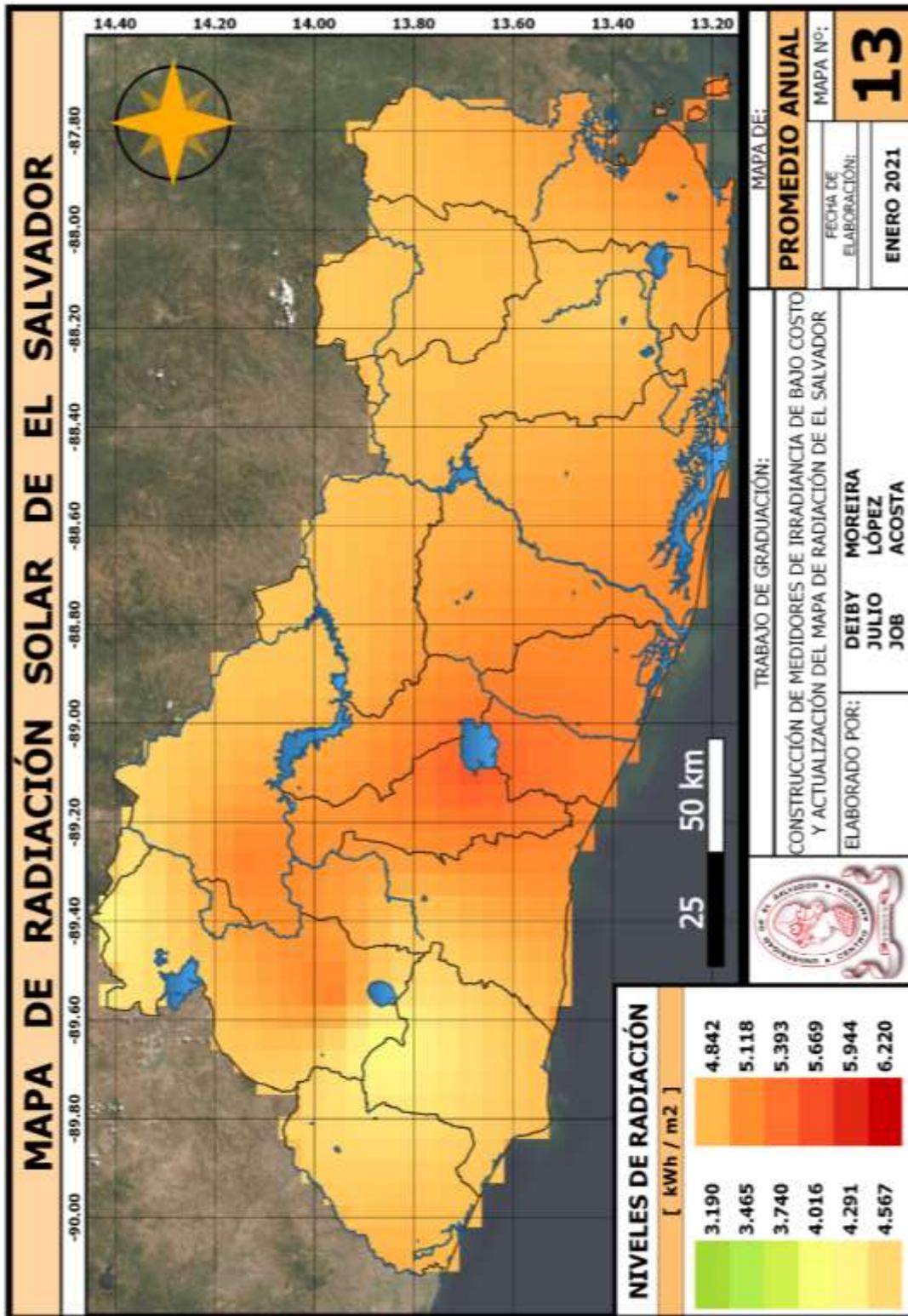


Figura 4-41 Mapa de radiación solar de promedio anual.

En la siguiente tabla se muestran los niveles máximos y mínimos de radiación solar para cada uno de los departamentos.

Tabla 4-9 Niveles anuales por departamento

DEPARTAMENTO	MIN [kWh% m ²]	MAX [kWh% m ²]	ÁREA [Km ²]
CHALATENANGO	4.50	5.23	2000.47
LA LIBERTAD	4.64	5.24	1635.53
LA PAZ	5.15	5.50	1225.57
AHUACHAPÁN	4.41	4.86	1192.70
SAN MIGUEL	4.68	4.99	2131.09
MORAZÁN	4.71	4.84	1315.37
SANTA ANA	4.11	5.19	2029.88
USULUÁN	4.86	5.18	2010.72
SAN VICENTE	4.89	5.19	1201.36
LA UNIÓN	4.75	5.21	1974.13
CABAÑAS	4.76	5.06	1097.44
SONSONATE	4.20	4.80	1234.64
CUSCATLÁN	4.95	5.39	747.36
SAN SALVADOR	5.08	5.59	901.59

4.4.1- ANALISIS DE LOS MAPAS CON VALORES REALES DE RADIACION

En la Figura 4.41 se muestra el mapa de radiación solar promedio anual, este será el mapa de referencia para estudiar el comportamiento de la radiación solar durante el año, sobre todo el territorio salvadoreño.

Las estaciones de monitoreo de irradiancia global construidos en el CAPITULO II de este documento, fueron instaladas en las ubicaciones antes mencionadas y tomaron registros de datos correspondientes al año 2020, estimando el promedio de estos datos se obtuvieron valores anuales para estas tres posiciones, además involucrando las dos estaciones de la GEO, podemos comparar valores reales contra los valores generados en el mapa de la Figura 4.41.

La Figura 4.42 muestra estos valores y el error correspondiente a cada uno de ellos.

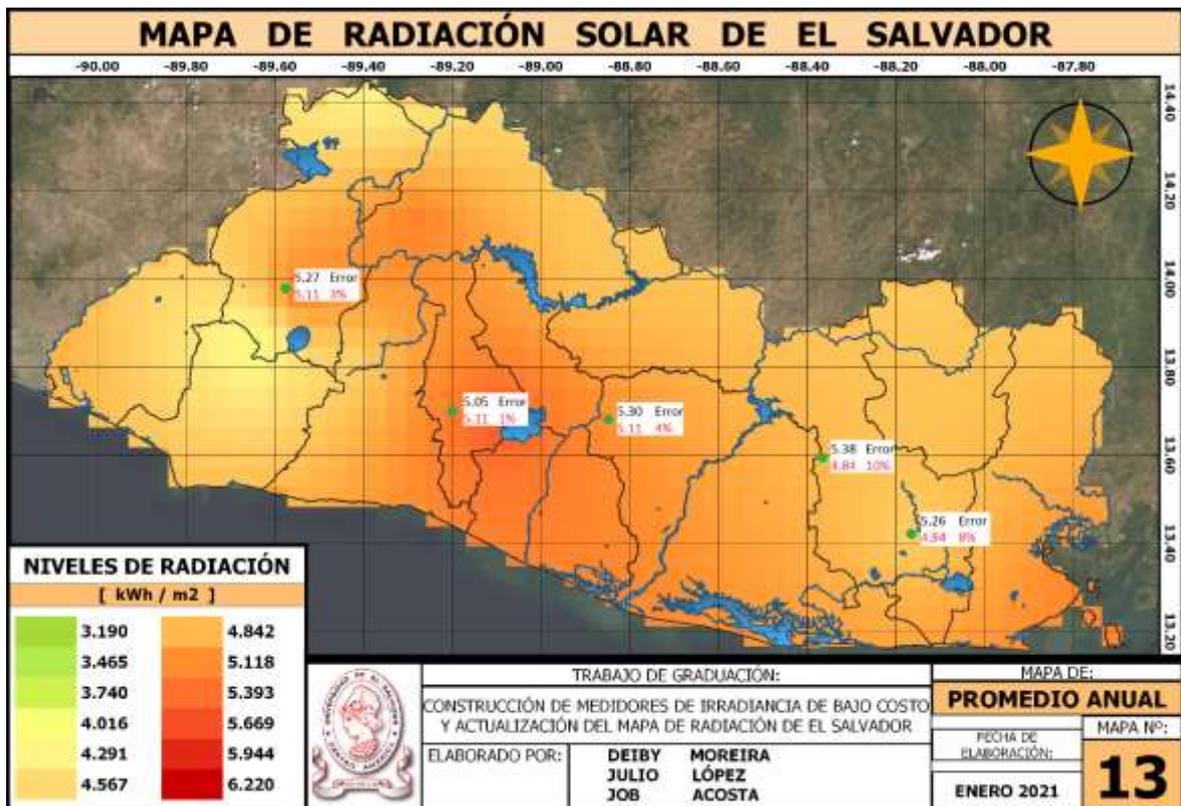


Figura 4-42 Resultado de la edición del mapa.

En la siguiente tabla se muestran de forma más clara el error que presenta cada uno de los cinco puntos evaluados, es notorio que para las estaciones de la FIA y FMOC el error es bastante bajo y esto es debido a que estas estaciones se encuentran relativamente cerca de otras estaciones de monitorio las cuales si fueron involucradas en la interpolación, por tal razón el error de interpolación en estas zonas es más bajo que por ejemplo en CH14 la cual no tiene estaciones cercas por tanto el error en estas zonas es más alto, la solución para tener un error más bajo y uniforme en todo el territorio es ubicar de forma estratégicas más puntos de muestreo para el recurso solar.

Tabla 4-10 Error de interpolación

Est.	Real	Interpolación	Error
CH14	5.38	4.84	10%
SV1	5.3	5.11	4%
FMOC	5.27	5.11	3%
FIA	5.05	5.11	1%
FMO	5.26	4.84	8%

4.5- COTEJO DEL MAPA ACTUALIZADO CON LOS ANTERIORES.

El clima de El Salvador es de tipo tropical seco y húmedo. Con únicamente dos estaciones o temporadas bien diferenciadas: la seca y la húmeda o de lluvias.

La temperatura media del país ronda los 24°C. Diciembre y enero son los meses más fríos, mientras que abril es el mes más caluroso. Las temperaturas máximas durante el año no suelen superar los 32°C. Y las mínimas no acostumbran a bajar de 16°C. Las temperaturas son más elevadas en la región costera del Pacífico que en el interior.

El clima de El Salvador destaca por su abundancia de precipitaciones, concentradas en más de un 90% durante la época de lluvias (Mayo – Octubre). Durante el resto del año ocasionalmente puede llover sobre el país. A partir de octubre, al terminar la época de lluvias, aparecen una serie de vientos frescos y secos. Vientos moderados con rachas de 10 km/h – 30 km/h.

Otra característica del clima de El Salvador es la cantidad de horas de sol que registra a lo largo de un año. Aproximadamente más de 3000 horas de sol al año.

Queda claro que el clima de El Salvador es caluroso. Pese a estas elevadas temperaturas propias de las llanuras costeras, el país también ofrece lugares de mayor altura y más frescos.

Así en El Salvador encontramos tres zonas climáticas, con sus diferencias en entre sí. Zonas que dependen en gran medida de la altitud, distancia con el mar o intensidad de los vientos.

RADIACIÓN PROMEDIO

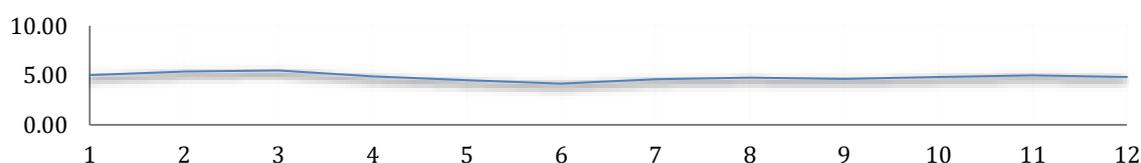


Figura 4-43 Comportamiento de la radiación solar promedio anual.

El Salvador además está dividido principalmente en cuatro zonas geográficas: Zona Occidental, Zona Central 1, Zona Central 2 y Zona Oriental, en la Figura 4-43 se muestran los departamentos que comprende cada una de estas zonas.



Figura 4-44 Zonas geográficas de El Salvador.

Se cotejarán tres mapas: el mapa correspondiente al promedio anual, el mapa del mes de febrero correspondiente a la temporada seca y el mapa del mes de junio correspondiente a la temporada lluviosa.

Los mapas a cotejar son los mapas generados en el trabajo de graduación: Actualización del mapa de radiación solar de El Salvador, presentado en noviembre del 2014 por: Carlos Enrique Cortez Méndez, Edgard alexander Menjívar Urquilla y Lester enrique padilla marroquín, asesorado por el Msc. Jorge Alberto Zetino Chicas.

Cotejo del mapa de radiación solar del promedio anual.

En la parte superior se encuentra el mapa generado en el 2014 mientras que en la parte inferior se encuentra el mapa actualizado, existe una clara diferencia en el método de interpolación y rampa de colores utilizadas, pero más allá de eso analizaremos la diferencia entre los niveles de radiación solar.

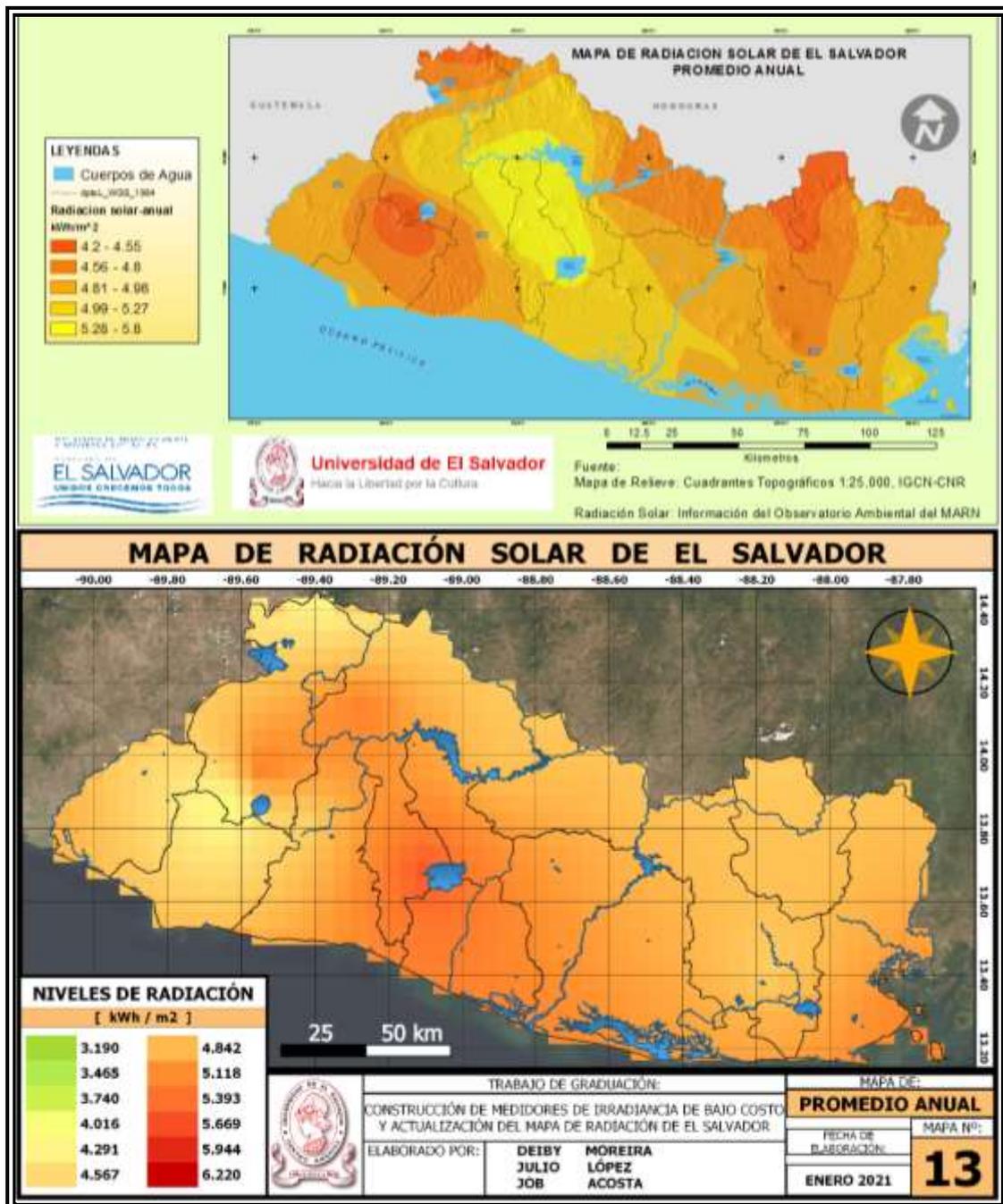


Figura 4-45 Cotejo del mapa anual.

Los niveles de radiación solar en general del mapa del 2014 son de 4.2 hasta 5.8 kWh/m² mientras que el mapa actualizado cuenta con una radiación de 4.29 hasta

5.66 kWh/m² siendo rangos muy similares. Al igual que el mapa del 2014, el mapa actualizado presenta unos mayores niveles de radiación solar en la zona central 1, mientras que la zona oriental presenta cambios leves en los niveles de radiación, en cuanto a cambios en los niveles de radiación es la zona central 2 la que presenta una mayor variación ya que el mapa actualizado indica que al oriente de esta zona la radiación es aproximadamente de 4.56 kWh/m² mientras que en la zonas fronteriza con la zona central 1 los niveles de radiación alcanza los 5.39 kWh/m².

Cotejo del mapa de radiación solar del mes de febrero.

El mapa del 2014 presenta unos niveles de radiación de 4.8 hasta 6.2 kWh/m², mientras que el mapa actualizado de febrero presenta una radiación de 4.84 hasta 6.22 kWh/m², por lo que en cuanto a los niveles máximos y mínimos de radiación solar prácticamente no se presentan cambios, la única variación es el nivel de precisión de los datos, el comportamiento de los niveles de radiación a lo largo del territorio Salvadoreño se mantiene, siendo la zona central 1 la que cuenta con un mayor nivel de radiación además de la mayor parte noroeste de la zona occidental, a excepción de Ahuachapán que en ambos mapas registra los niveles de radiación más bajos. Al tratarse de un mes con un clima en temporada seca, es acá donde se muestran unos de los niveles de radiación solar más alto ya que en los niveles de nubosidad son más bajos que en las épocas de lluvia.

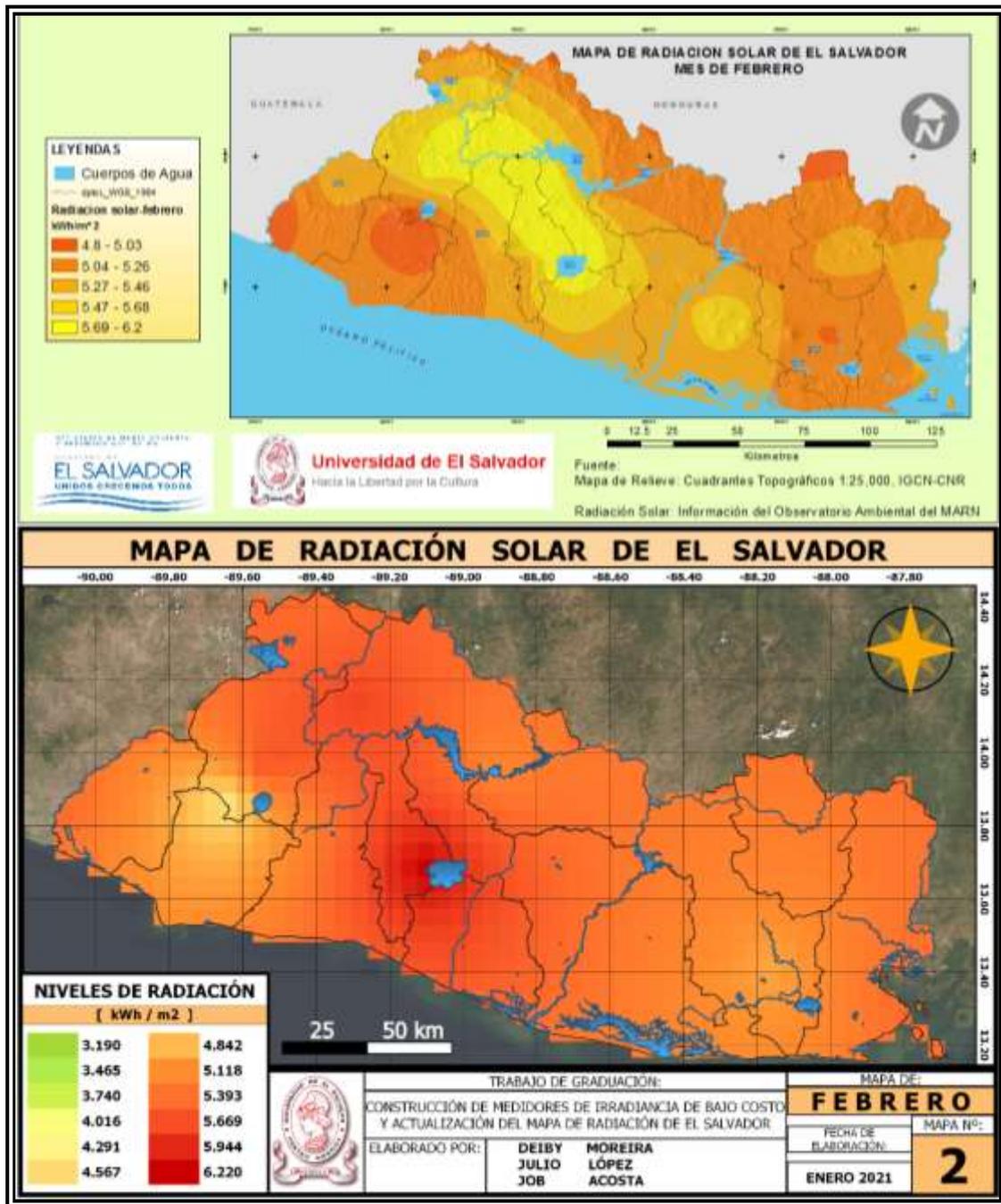


Figura 4-46 Cotejo del mapa de febrero.

Cotejo del mapa de radiación solar del mes de junio.

Junio corresponde a un mes donde el clima es característico por la época lluviosa, por tanto, los niveles de nubosidad son más altos y eso se ve reflejado en los niveles de radiación solar los cuales son más bajos en el mapa del 2014 estos niveles corresponden desde 3.4 hasta 5.6 kWh/m² y para el mapa actualizado son de 3.19 hasta 4.84 kWh/m².

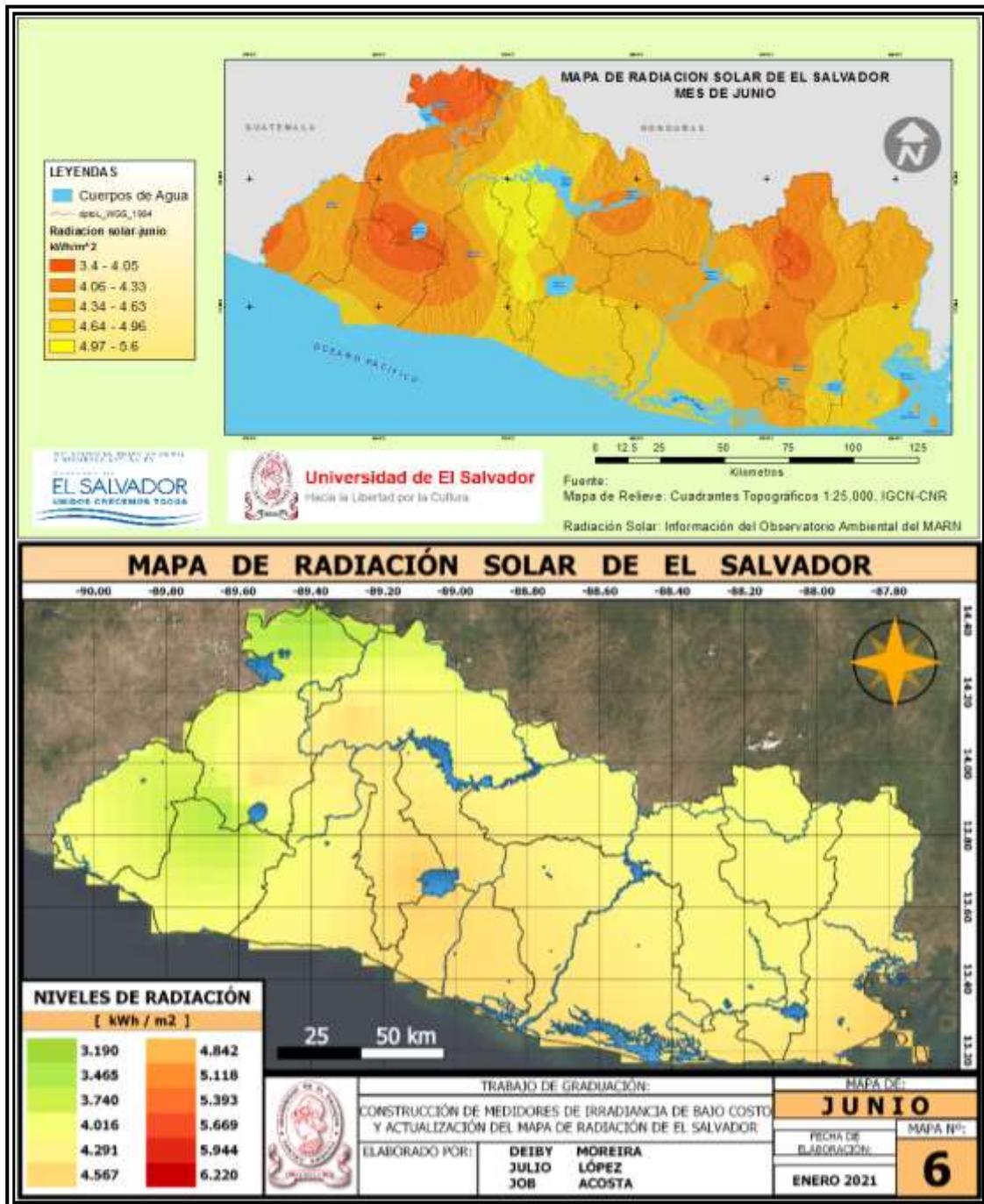


Figura 4-47 Cotejo del mapa de junio.

En ambos mapas es posible apreciar que los niveles de radiación solar se dan en Ahuachapán y la zona norte de Santa Ana mientras el mapa del 2014 muestra unas pequeñas variaciones en el resto del territorio en el mapa actualizado se puede apreciar que la mayor parte de la zona central 2 y la zona oriental cuenta con un nivel de radiación de 4.016 kWh/m² siendo estos los niveles de radiación solar predominantes en este mes de época lluviosa.

Cabe destacar que ambos mapas fueron generados prácticamente con las mismas estaciones meteorológicas las variantes radican en los periodos de registros de datos. Pero es evidente que la zona oriental presenta una menor variación en sus niveles de radiación y esto acorde a la Figura 3-3 donde se muestra que en esta zona solamente se cuenta con tres puntos de muestra y esto indica que el error de la interpolación es mayor en esta zona, al igual que en la zona central 1 se muestran valores más exactos debido a que es en esta zona donde se cuenta con una mayor cantidad de puntos de muestra.

El trabajo de graduación: Actualización del mapa de radiación solar de El Salvador, presentado en noviembre del 2014, contiene dos series de mapas, la primera correspondiente al estudio principal que era la actualización del mapa en ese año y la segunda un conjunto de mapas que comprendía el periodo 2005-2013, a continuación, se presentaran estas dos series con los resultados obtenidos en este trabajo.

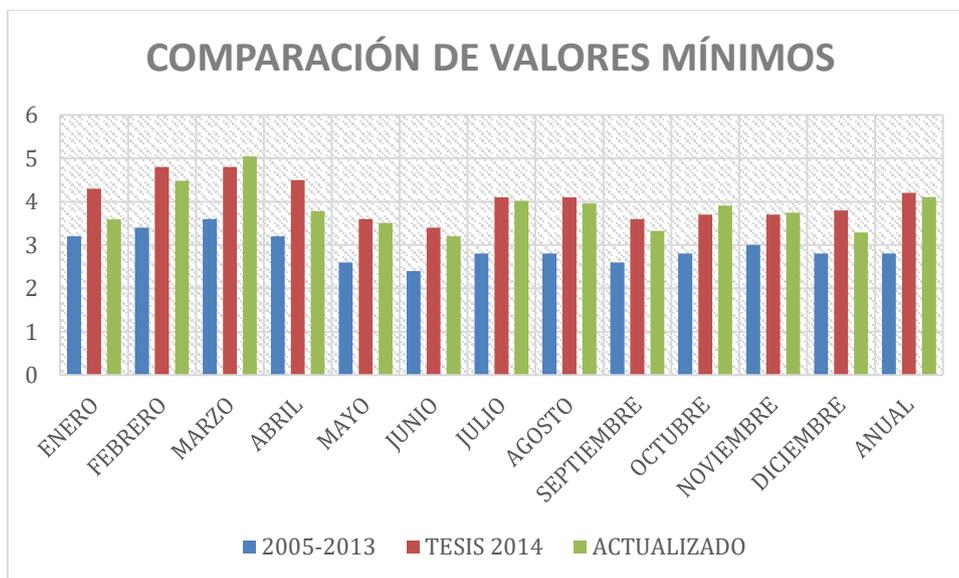


Figura 4-48 Comparación de los valores mínimos de radiación

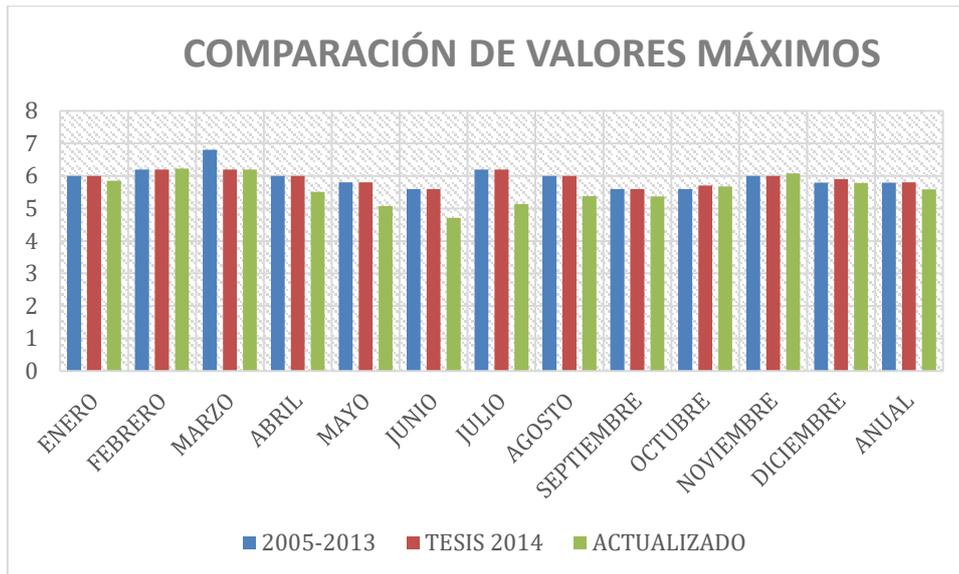


Figura 4-49 Comparación de los valores máximos de radiación

Existe además un cuarto mapa correspondiente al proyecto de SWERA, en la siguiente figura se muestra el cotejo de los cuatro mapas anuales.

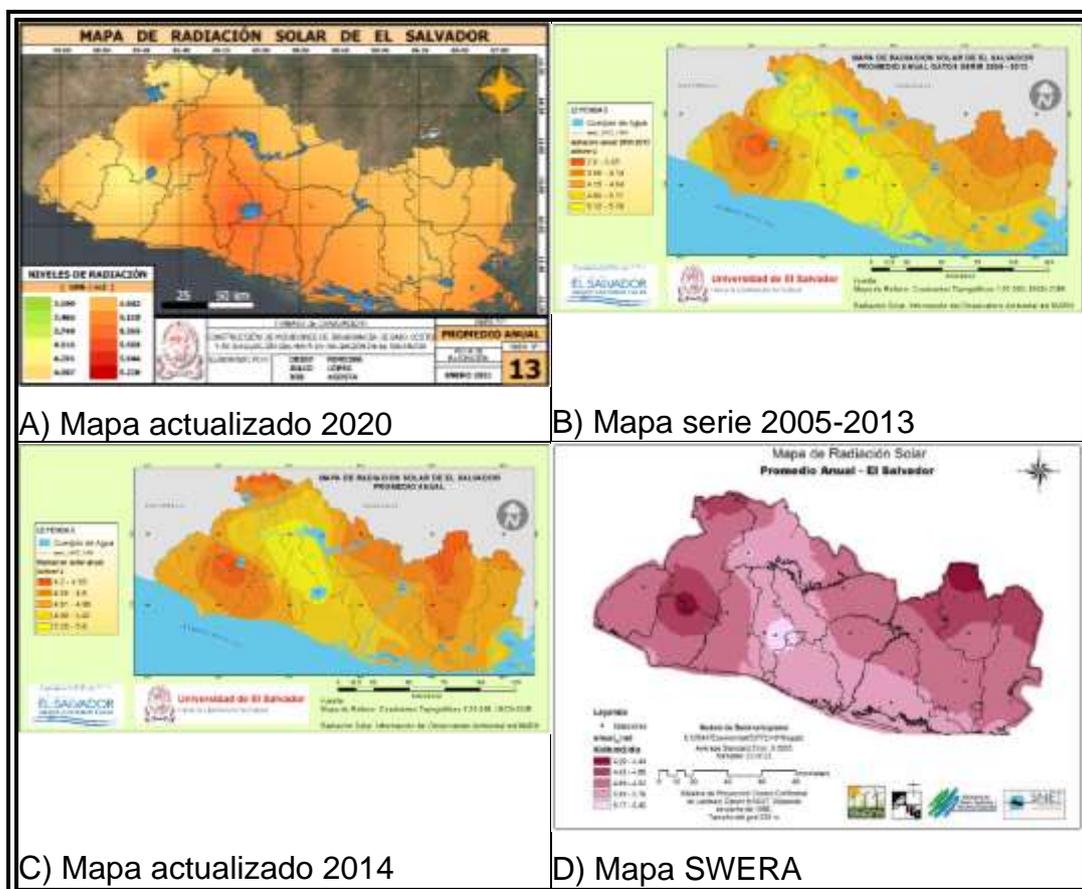


Figura 4-50 Cotejo de los 4 mapas anuales

El mapa “A” correspondiente a la actualización en este trabajo presenta un comportamiento similar a los tres mapas restantes en el patrón de los niveles de radiación en el territorio salvadoreño, los cuatro mapas tienen niveles de radiación bajos en la zona sur de Sonsonate, la zona central 1 cuenta con los niveles de radiación más altos de todo el territorio, mientras que la zona oriental cuenta con variaciones leves en los niveles de radiación, esto es principalmente debido a que cuenta con pocos puntos de muestreo lo que produce que los cambios en los niveles de radiación sean bajos.

La siguiente tabla muestra los niveles máximos y mínimos de los cuatro mapas anuales de radiación, tomando como base el promedio de estos cuatro datos, calculamos los errores máximos y mínimos de estos niveles, donde es posible apreciar como el mapa actualizado y generado en este documento cuenta con el error promedio más bajo de todos siendo del 1.42%.

Tabla 4-11 Comparación de los mapas anuales

MAPA	VALORES		ERROR RESPECTO AL PROMEDIO DE LOS VALORES		
	MAX	MIN	MAX	MIN	PROMEDIO
SWERA	5.4	4.2	5.10%	1.08%	3.09%
2005-2013	5.79	2.8	1.76%	32.61%	17.18%
TESIS 2014	5.8	4.2	1.93%	1.08%	1.51%
ACTUALIZADO	5.59	4.11	1.76%	1.08%	1.42%
PROMEDIO	5.69	4.155			

Como parte de la investigación, al recaudar datos propios durante un año con los cuatros medidores construidos, se elaboro un mapa que combine los datos del año 2020. De esta manera se puede observar una mejor representación de la información de niveles de irradiancia en el país y se logra reducir el porcentaje de error en las áreas donde se colocaron los medidores.

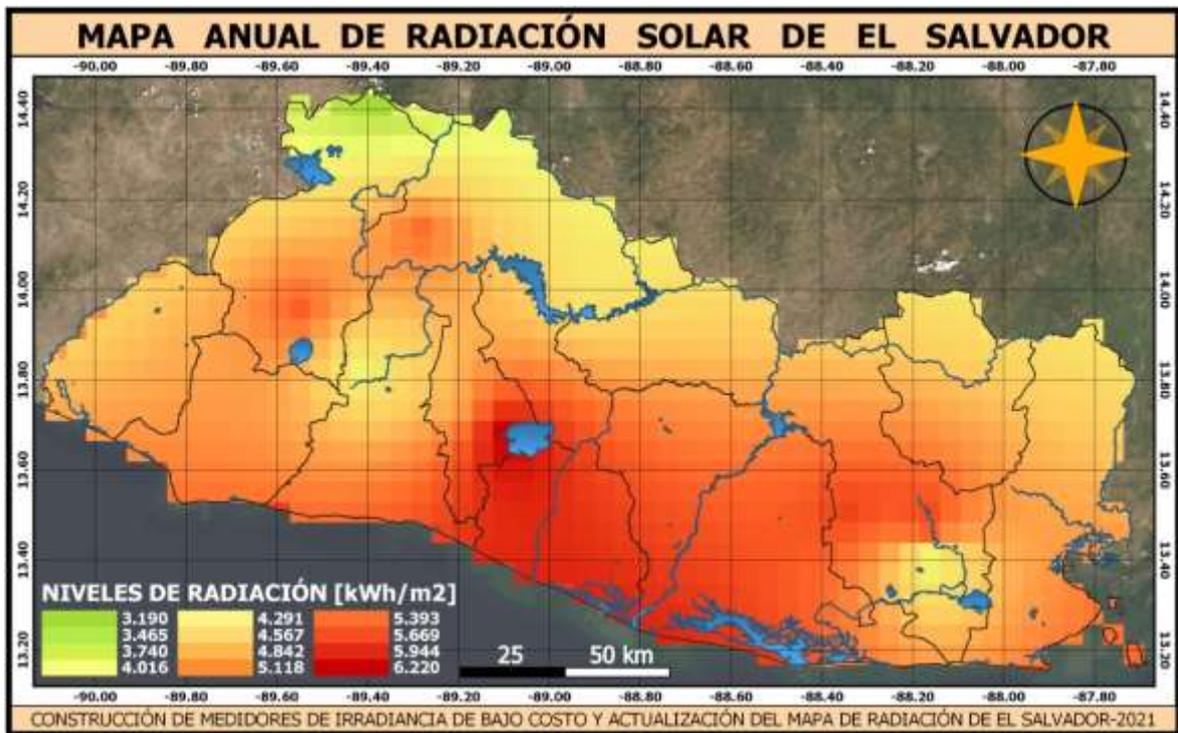


Figura 4-51 Mapa Actualizado, combinando datos de los medidores construidos.

Al comparar el resultado del mapa actualizado con este trabajo con los mapas del proyecto SWERA, es posible apreciar que el valor máximo de radiación se ha incrementado en un 3.51%, mientras que el valor mínimo se ha reducido un 2.14%, lo que implica que el ancho del espectro de los niveles de radiación se ha incrementado notablemente.

5-CONCLUSIONES

- Elaborar un medidor de irradiancia con alto porcentaje de confiabilidad fue posible al tomar la decisión de sustituir la placa Arduino, por una Raspberry pi. Las limitaciones observadas usando la placa Arduino fueron: Reinicio de la placa Arduino ante corte de suministro de energía, velocidad de lectura de la placa Arduino, y falta de estabilidad en la etapa amplificador al ser sometida a varias horas de trabajo continuo. Dichas limitaciones no fueron posibles solucionar y mantener el objetivo de un medidor de bajo costo.
- Para que se produzca una consulta estable vía internet, es necesario considerar la opción de pagar una IaaS (Infrastructure as a Service). Esto consiste en un PC montado en la nube. De esta manera obtendríamos una dirección IP pública, la que puede ser consultada desde cualquier navegador en cualquier parte del mundo. Por lo que los datos de todos los medidores estarán en una sola base de datos.
- El error presente en los mapas principalmente es debido a los pocos puntos de muestreo existentes, como se puede ver en la comparación con los mapas anteriores. Todos presentan el mismo patrón en los niveles de radiación, esto debido a que todos los mapas de radiación solar de El Salvador existentes han sido generados con los datos de las mismas estaciones meteorológicas, y esto no indica que dichos datos sean erróneos. Por el contrario, los resultados reflejan que existen muy pocos puntos de muestreo, la implementación e instalación de las estaciones de monitoreo de irradiancia global de bajo costo generarán una base de datos más fiable para dicho recurso. Esto a su vez garantiza una reducción en el error de interpolación.
- Los resultados de la actualización del mapa de radiación de El Salvador fueron cotejados con los mapas existentes de dicho recurso, y en este proceso se ve claramente que los niveles de radiación respecto al trabajo de graduación del 2014 se han reducido. Mientras que al compararlos con los resultados del proyecto SWERA los niveles de radiación han

sufrido un incremento, esta contradicción se debe principalmente al tratamiento de los datos y el método de interpolación utilizado. A diferencia de los resultados del 2014 los errores son menores y la fiabilidad de los datos es aún mayor; además el comportamiento de los niveles de radiación de los últimos diez años muestra que los niveles de radiación prácticamente se han mantenido iguales, aunque con un notable pequeño incremento. Por tanto, los niveles de radiación solar en El Salvador desde el proyecto SWERA efectivamente han incrementado, y la actualización del mapa de radiación presentada en este trabajo muestra el error más bajo respecto al promedio de los mapas existentes.

- La reducción de los errores de interpolación de los mapas se debe principalmente a la cantidad de puntos de muestreo que existen. Para reducir estos errores se cuenta con dos alternativas: La reparación y mantenimiento constante de las treinta estaciones del SNET que registran los parámetros relacionados a la radiación solar, o La implementación de las estaciones de monitoreo de irradiancia global de bajo costo. La principal ventaja de implementar estaciones de monitoreo de bajo costo es la ubicación estratégica de los puntos de muestreo para tener un registro más uniforme dentro del territorio salvadoreño.

6-ANEXOS

6.1- Anexo A.

```
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include "RTCLib.h" //https://github.com/NeiroNx/RTCLib
// Declaramos el rtc a usar CS1307 RTC; o DS3231 RTC;
DS1307 RTC;
//DS3231 RTC;

// Creamos el archivo que contendra los datos en la memoria
File Archivo;

// Declaramos todas las variables que utilizaremos

int lectura      = 0; // Registrara la lectura de la entrada analogica
int lectura1     = 0; // Registrara la lectura de la entrada analogica
int lectura2     = 0; // Registrara la lectura de la entrada analogica
int lectura3     = 0; // Registrara la lectura de la entrada analogica

float G          = 0; // Ganancia generada para el dato momentaneo
float V          = 0; // Voltaje calculado momentaneamente
float mv         = 0; // Valor en milivoltios de la lectura instantanea
float IRRA       = 0; // Contendra el valor de la Irradiancia
float tiempoH    = 0; // Registrar el valor de las horas
float tiempoS    = 0; // Registrar el valor de los segundos

const int LED = 13;
const int chipSelect = 4;

void setup() {
  // Abriendo la comunicadion serial
  Serial.begin(9600);
  Wire.begin();
  //Definiendo los pines a usar
  pinMode(LED, OUTPUT);

  // Anulamos el perisferico de ethernet ya que no lo usaremos
  pinMode(10, OUTPUT);
  digitalWrite(10, HIGH);

  // Mostramos la inicializacion del programa
  Serial.println("");
  Serial.println("I N I C I A N D O   E L   P R O G R A M A");
  delay(800);
  Serial.print(".....");
  delay(800);
  Serial.print(".....");
  delay(800);
  Serial.println(".....");
  delay(800);

  // Enciende el led si la comunicacion no es posible el led queda encendido
  digitalWrite(LED, HIGH);

  // Se inicia la comunicacion con la SD usando el pin 4
  Serial.println("Inicializando la tarjeta SD...");
```

```

// Ethernet Shield viene con una ranura para tarjeta SD integrada.
// El pin CS para la tarjeta SD se ha movido al pin 4.
// Creamos un ciclo en el cual estara inicializando la micro SD
// y saldra de este hasta que la conexion sea exitosa.
int sdlec= 1;
while( sdlec == 1 ){
  SD.begin();
  delay(1000);
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.print("E R R O R ");
    delay(250); Serial.print(" .");
    delay(250); Serial.print(" .");
    delay(250); Serial.print(" .");
    Serial.print(" C o n e c t a n d o ");
    delay(500); Serial.print(" .");
    delay(500); Serial.print(" .");
    delay(500); Serial.println(" .");
  }
  else {
    Serial.println("C O N E X I O N   E X I T O S A");
    sdlec = 0;
  }
}
digitalWrite(LED, LOW );
delay(200);
digitalWrite(LED, HIGH);
}
// Depuracion por haber terminado la comunicacion con la SD
LEDSS();

//Inicia la comunicacion con la RTC si esta no se da el led queda encendido
Serial.println("Inicializando la RTC...");
sdlec= 1;
while( sdlec == 1 ){
  digitalWrite(LED, HIGH);
  RTC.begin();
  delay(1000);
  //RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__)); // Sincronizamos la hora
  if (!RTC.isrunning()){
    delay(1000);
    Serial.println("El modulo RTC no esta corriendo");
    digitalWrite(LED, LOW);
    delay(200);
  }
  else{
    Serial.print("Fecha configurada >>>>> ");
    sdlec= 0;
  }
}

// YYYY/MM/DD HH:MM:SS
DateTime now = RTC.now();
Serial.print( now.year() );      Serial.print('/');
Serial.print( now.month() );     Serial.print('/');
Serial.print( now.day() );       Serial.print(' ');
Serial.print( now.hour() );      Serial.print(':');
Serial.print(now.minute());      Serial.print(':');
Serial.print(now.second());      Serial.println(' ');

// Led parpadea indicando que se establecio comunicacion con el rtc
LEDSS();
}

void loop() {
  // Comprobamos si la RTC continua corriendo
  // Si esta funcionando correctamente, el programa continua normalmente
  // Si la RTC no funciona, encendera un led y se quedara en bucle
  int sdlec= 1;
  while( sdlec == 1 ){

```

```

if (!RTC.isrunning()){
    Serial.println("El modulo RTC no esta corriendo");
    digitalWrite(LED, HIGH);
    delay(500);
    RTC.begin();
    delay(500);
    digitalWrite(LED, LOW);
    delay(250);
}
else{
    sdlec= 0;
}
}

// Definimos para consultar la hora real a la RTC instalada
DateTime now = RTC.now();

// Guardamos el valor de la hora actual
tiempoH = now.hour();
// Comparacion para tomar datos unicamente entre las 05:00 am a 6:00 pm
if ((tiempoH >= 6) && (tiempoH < 17)) {
    // Guardamos el segundo actual para tomar datos exactamente cada minuto
    tiempoS = now.second();
    if ((tiempoS >= 0) && (tiempoS <= 2)){
        // Cada medidor tiene una ganancia con un comportamiento distinto, por tanto
        // Para cada medidor se crean lineas de interpretacion distintas
        // A continuacion se muestran comentada cada funcion, pero se descomentara
        // la funcion correspondiente al medidor que se le cargara

        // MEDIDOR 1 Y SU RESPECTIVA GANANCIA
        // 310 contador
        // Vin max= 3.3V
        //G_MEDIDOR1();

        // MEDIDOR 2 Y SU RESPECTIVA GANANCIA
        // 320 contador
        // Vin max= 3.2V
        G_MEDIDOR2();

        // MEDIDOR 3 Y SU RESPECTIVA GANANCIA
        //320 contador
        // Vin max= 3.2V
        //G_MEDIDOR3();

        // Conversion de las lecturas a IRRADIANCIA
        // IRRA= mV/( Constante del pir * 0.001);
        // Por tanto el valor de la constate del piranometro se modificara
        // con el valor correspondiente al pir usado.
        IRRA = mv / (19.07 * 0.001);

        // Convertiendo a String el valor de la irradiancia
        String req = "\tI=\t";
        req = req + String(IRRA);

        // fecha= YYYY/MM/DD HH:MM
        DateTime now = RTC.now();
        char fecha[20];
        int da = now.day();      int mo = now.month();   int ye = now.year();
        int ho = now.hour();     int mi = now.minute(); int se = now.second();
        sprintf( fecha, "%.2d/%.2d/%.4d\t%.2d:%.2d:%.2d", da, mo, ye, ho, mi, se);

        // Formato con el que se presentara la info en el Serial
        // año/mes/dia  hora:minuto:segundo  I= Valor  V= Valor
        Serial.print(String( fecha ));      Serial.print(req);
        Serial.print("\t V=\t");           Serial.print(lectura);
        Serial.print("\t mV=");            Serial.print(mv);
        Serial.print("\t ganancia=");      Serial.println(G);
    }
}

```

```

// Inicia el proceso de escritura en memoria
digitalWrite(LED, HIGH);
delay(250);
// Comprueba que se este comunicando con la memoria
int sdlec= 1;
while( sdlec == 1 ){
  SD.begin(); delay(500);
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.print(" <4> "); delay(500);
  }
  else {
    Serial.print("SD Conectada en el pin 4 --- "); sdlec = 0;
  }
}
// Escribe en el archivo datos.txt
Archivo = SD.open("datos.txt", FILE_WRITE);
if (Archivo) {
  Archivo.print(String( fecha ));   Archivo.print(req);
  Archivo.print("\t V=\t");         Archivo.print(lectura);
  Archivo.print("\t mV= ");         Archivo.print(mv);
  Archivo.print("\t G= ");         Archivo.println(G);
  Serial.print(Archivo.size());
  Serial.println(" Bytes");
  Archivo.close();
}
digitalWrite(LED, LOW);
delay(250);
}
}
delay(2000);
}

void LEDSS() {
  digitalWrite(LED, LOW ); delay(1000);
  digitalWrite(LED, HIGH); delay(150);
  digitalWrite(LED, LOW ); delay(150);
  digitalWrite(LED, HIGH); delay(150);
  digitalWrite(LED, HIGH); delay(3000);
  digitalWrite(LED, LOW ); delay(1000);
}

void G_MEDIDOR1() {
  // Leemos la entrada analogica A0
  // Resolveremos la posible situacion donde obtengamos datos atipicos
  // para ello tomaremos tres medidas desfasadas 100ms cada una de ellas
  lectura1 = analogRead(A1);
  delay(100);
  lectura2 = analogRead(A1);
  delay(100);
  lectura3 = analogRead(A1);
  delay(100);

  MEDIANA ();

  V = lectura / 310;
  G = 142;
  mv = ( V / G ) * 1000;

  // Vdig = mV * G * Contador

```

```

// Primera comparacion de ganancia
if ( mv < 20 ) {
    mv = 0.011 * pow ( lectura , 1.10742 );
    G = 97.78 * pow ( ( mv * 0.001 ) , -0.097 );
    V = ( G * mv ) * 0.001;
}
// Segunda comparacion de ganancia
if ( mv < 10 ) {
    mv = 0.005 * pow ( lectura , 1.21951 );
    G = 66.781 * pow ( ( mv * 0.001 ) , -0.18 );
    V = ( G * mv ) * 0.001;
}
// Tercera comparacion de ganancia
if ( mv < 5 ) {
    mv = 0.0003527 * pow ( lectura , 1.71233 );
    G = 18.92 * pow ( ( mv * 0.001 ) , -0.416 );
    V = ( G * mv ) * 0.001;
}
}

void G_MEDIDOR2() {
    // Leemos la entrada analogica A0
    // Resolveremos la posible situacion donde obtengamos datos atipicos
    // para ello tomaremos tres medidas desfasadas 100ms cada una de ellas
    lectura1 = analogRead(A0);
    delay(100);
    lectura2 = analogRead(A0);
    delay(100);
    lectura3 = analogRead(A0);
    delay(100);

    MEDIANA();

    V = lectura / 320;
    G = 142;
    mv = ( V / G ) * 1000;

    // Vdig = mV * G * Contador
    // Primera comparacion de ganancia
    if ( mv < 20 ) {
        mv = 0.011 * pow ( lectura , 1.10742 );
        G = 97.78 * pow ( ( mv * 0.001 ) , -0.097 );
        V = ( G * mv ) * 0.001;
    }
    // Segunda comparacion de ganancia
    if ( mv < 10 ) {
        mv = 0.005 * pow ( lectura , 1.21951 );
        G = 66.781 * pow ( ( mv * 0.001 ) , -0.18 );
        V = ( G * mv ) * 0.001;
    }
    // Tercera comparacion de ganancia
    if ( mv < 5 ) {
        mv = 0.00033408 * pow ( lectura , 1.71233 );
        G = 18.92 * pow ( ( mv * 0.001 ) , -0.416 );
        V = ( G * mv ) * 0.001;
    }
}

void G_MEDIDOR3() {
    // Leemos la entrada analogica A0
    // Resolveremos la posible situacion donde obtengamos datos atipicos
    // para ello tomaremos tres medidas desfasadas 100ms cada una de ellas
    lectura1 = analogRead(A0);
    delay(100);
    lectura2 = analogRead(A0);
    delay(100);
    lectura3 = analogRead(A0);
    delay(100);
}

```


6.2- Anexo B.

Instalación de los tres medidores basados en arduino.

PRIMER MEDIDOR (M1).

El medidor M1 se instaló en la sede central de la Universidad de El Salvador, en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, sobre el techo de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, cuyas coordenadas son: LAT.: 13.720693°N, LON: -89.200204°O.



Figura 6-1 Ubicación del medidor M1.

Las siguientes figuras muestran el edificio y sitio de instalación del medidor.



Figura 6-2 Edificio donde se encuentra instalado el medidor M1.



Figura 6-3 Edificio donde se encuentra instalado el medidor M1.



Figura 6-4 Piranómetro con constante de calibración: $19.07 \text{ uVm}^2/\text{W}$.



Figura 6-5 Instalación del piranómetro.

SEGUNDO MEDIDOR (M2).

El medidor M2 se instaló en la facultad multidisciplinaria occidental de la Universidad de El Salvador, cuyas coordenadas son: LAT.: 13°58'13.88"N, LON: 89°34'25.62"O.



Figura 6-6 Ubicación del medidor M2.

Las siguientes figuras muestran el edificio y sitio de instalación del medidor.



Figura 6-7 Edificio donde se encuentra instalado el medidor M2.



Figura 6-8 Edificio donde se encuentra instalado el medidor M2.



Figura 6-9 Piranómetro con constante de calibración: 17.00 $\mu\text{V}/\text{W}$.



Figura 6-10 Instalación del piranómetro.



Figura 6-11 Medidor M2, instalado en la sala de reuniones del decanato.

TERCER MEDIDOR (M3).

El medidor M3 se instaló en la facultad multidisciplinaria oriental de la Universidad de El Salvador, cuyas coordenadas son: LAT.: 13°26'25.66"N, LON: 88° 9'31.00"O.



Figura 6-12 Ubicación del medidor M3.

Las siguientes figuras muestran el edificio y sitio de instalación del medidor.



Figura 6-13 Edificio donde se encuentra instalado el medidor M3.



Figura 6-14 Edificio donde se encuentra instalado el medidor M3.



Figura 6-15 Piranómetro con constante de calibración: $16.40 \mu\text{V m}^2/\text{W}$.



Figura 6-16 Instalación del piranómetro.



Figura 6-17 Medidor M3, instalado en la segunda planta de la biblioteca, solón de Administración.

6.2.1- Anexo B2.

A continuación, los datos descargados durante el año 2020, de los tres medidores instalados.

Medidor instalado en la Facultad Multidisciplinaria Occidental.

Santa Ana													
Meses	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
enero	33.98	107.74	306.21	502.95	681.71	783.19	814.84	743.07	649.69	504.51	333.02	140.15	49.73
febrero	31.38	120.23	307.56	524.46	669.30	773.53	791.05	800.82	696.91	571.38	396.06	165.81	62.71
marzo	45.18	169.17	380.89	600.80	766.76	868.12	898.22	856.10	740.87	593.62	404.80	185.74	65.41
abril	51.55	174.09	362.97	512.95	638.19	695.02	660.27	684.73	607.13	526.55	354.96	155.39	66.40
mayo	60.89	158.81	318.36	451.14	621.14	653.69	656.61	635.92	503.27	419.12	306.47	130.50	54.42
junio	62.69	153.98	286.97	373.99	466.07	508.19	515.54	600.68	553.16	420.19	263.04	154.57	75.67
julio	61.40	188.47	366.91	530.64	661.89	734.09	701.87	703.14	637.12	474.15	290.66	148.78	79.09
agosto	56.36	156.10	319.65	467.41	553.45	620.61	656.05	607.45	460.73	330.10	199.68	102.30	49.48
septiembre	52.85	185.94	368.31	560.95	704.26	711.75	742.61	633.57	518.00	403.75	253.36	100.29	44.95
octubre	51.55	164.49	342.95	523.44	665.64	723.73	675.20	599.11	469.39	391.83	213.05	79.06	28.88
noviembre	42.00	141.68	339.04	474.32	575.65	641.10	624.97	559.32	490.89	336.83	186.61	64.65	38.78
diciembre	39.31	125.15	317.36	500.24	640.44	753.28	768.69	700.99	600.68	463.48	247.53	89.30	33.33

Medidor instalado en la Facultad Multidisciplinaria Oriental.

San Miguel													
Meses	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
enero	14.13	92.49	293.02	495.32	665.90	766.07	792.08	725.37	632.01	491.39	322.67	126.48	33.31
febrero	17.89	104.03	294.48	501.15	655.34	754.42	771.87	787.20	680.25	559.73	379.06	149.35	49.88
marzo	29.23	140.19	368.27	581.84	754.43	851.76	881.53	830.93	717.62	577.94	383.90	171.27	64.12
abril	38.44	148.94	350.42	500.70	617.58	681.46	657.35	671.98	592.00	506.97	333.84	141.86	43.70
mayo	41.61	143.53	300.79	433.82	611.68	644.97	629.09	609.01	494.65	396.75	281.90	119.91	51.06
junio	46.77	134.76	267.00	365.11	454.41	494.19	500.48	585.82	533.88	413.78	250.50	133.58	40.41
julio	43.19	168.61	341.87	512.69	648.30	727.67	689.88	692.34	612.95	453.83	271.21	131.86	56.00
agosto	30.48	134.73	309.05	439.73	536.44	608.25	640.36	586.15	442.35	313.99	175.10	82.68	35.22
septiembre	31.13	169.99	354.19	545.68	700.41	706.16	722.53	614.52	500.12	378.80	233.53	84.00	26.88
octubre	29.86	157.82	329.97	500.25	651.15	709.22	656.56	585.28	453.01	378.97	195.09	59.66	11.07
noviembre	26.11	128.80	302.93	458.36	565.96	624.88	606.89	546.81	464.31	321.13	174.52	52.16	18.12
diciembre	21.08	111.53	307.67	488.92	627.40	722.15	744.84	694.15	573.41	438.34	231.06	76.36	11.34

Medidor instalado en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

UES													
Meses	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ene	29.12	101.93	302.80	507.37	697.03	780.76	815.36	737.22	645.30	500.00	324.51	136.72	45.37
feb	40.58	120.50	310.61	511.58	670.77	771.22	790.52	803.52	698.77	572.65	393.44	163.90	71.23
mar	42.67	160.69	376.73	607.42	758.59	860.45	900.74	851.25	734.29	597.20	401.73	189.27	83.02
abr	48.54	169.46	368.52	508.26	642.39	699.26	662.86	694.02	611.83	523.66	348.92	157.54	67.13
may	55.26	156.62	314.48	443.96	614.39	657.59	651.23	639.17	508.00	425.74	298.69	128.93	50.77
jun	58.76	149.68	279.82	378.48	460.74	506.90	518.19	595.43	557.30	422.22	271.40	150.27	59.64
jul	66.24	194.61	360.89	524.12	667.96	743.62	698.25	715.52	635.24	471.58	298.02	143.70	78.03
ago	56.77	152.60	324.74	462.93	556.26	622.12	661.89	591.66	460.25	325.30	192.43	99.72	47.35
sep	48.42	183.51	370.30	563.84	709.86	711.47	741.55	642.78	518.37	400.10	249.29	98.54	48.95
oct	56.44	171.41	336.22	511.50	671.82	725.99	672.86	591.87	461.74	396.10	211.52	82.08	42.20
nov	40.66	152.80	324.41	485.13	578.79	652.25	624.69	566.14	492.06	339.98	183.79	64.10	32.62
dic	35.47	132.63	319.29	502.57	645.73	746.07	764.53	707.81	593.23	451.66	249.36	91.92	35.24

6.3- Anexo C.

[AT]: Temperatura del Aire (°C)

[BA]: Voltaje de Batería (Voltios)

[BP]: Presión Barométrica (milibares)

[DA]: Dir. del Viento (Prom) (Grados)

[DI]: Dir. del Viento (Inst) (Grados)

[DP]: Punto de Rocío (°C)

[DR]: Dir. de Ráfaga Diaria (Grados)

[HG]: Nivel del Río (m)

[HR]: Luz Solar (Hrs)

[LW]: Humedad de Hoja (%)

[MA]: Marea (cm)

[PC]: Precipitación Acumulada (mm)

[PP]: Precipitación Instantánea (mm)

[QI] : Caudal Instantáneo (m³/s)

[RA]: Ráfaga (Nudos)

[RI]: Radiación Solar Instantánea (Wh/m²)

[RH]: Humedad Relativa (%)

[SA]: Vel. del Viento (Prom) (Nudos)

[SI] : Vel. del Viento (Inst) (Nudos)

[SM]: Humedad del Suelo (%)

[SO]: SO₂ (mg/Nm³)

[SR]: Radiación Solar (Wh/m²)

[ST]: Temperatura del Suelo (°C)

Tabla 6-1 Estaciones de la Red Meteorológica de El Salvador y los parámetros que registran.

ES.	NOMBRE	AT	BA	BP	DA	DI	DP	DR	HG	HR	LW	MA	PC	PD	PP	QI	RA	RI	RH	SA	SI	SM	SO	SR	ST	
2	El Zapotillo		x						x				x			x										
3	Belén Gualcho	x	x	x									x		x				x						x	
4	Ilopango	x		x	x	x	x			x			x		x		x		x	x	x				x	
5	La Ceibita		x										x		x											
6	Las Cruces		x										x		x											
7	La Lechuza		x						x				x			x										
8	Chapeltique		x										x		x											

65	Pto Parada	x		x	x					x	x			x		x		x	x		x		x	x
66	Moropala		x						x				x											
67	Huizucar		x										x	x										
72	Apaneca		x										x	x										
75	Panchimalco		x										x	x										
76	Comasagua		x										x	x										
77	Tonacatepeque		x										x	x										
78	Ilobasco		x										x	x										
80	Guadalupe		x										x	x										
81	Verapaz		x										x	x										
82	Chirilagua		x										x	x										
84	Berlin		x										x	x										
85	Conchagua		x										x	x										
86	Melara		x						x				x		x									
87	Guazapa		x						x				x		x									
88	Sanisidro		x						x				x											
89	Laquesera		x						x				x		x									
90	San Vicente hidro		x						x				x		x									
91	Pasaquina		x						x				x		x									
92	La Canoa		x						x				x		x									
94	La Cañada	x		x	x				x	x			x	x		x	x	x	x		x		x	x
95	Santa Cruz Portillo	x		x	x				x	x			x	x		x	x	x	x		x		x	x
96	Perquin	x		x	x				x	x			x	x		x	x	x	x		x		x	x

6.4- Anexo D.

A continuación, se muestran los resultados mensuales y anual del promedio de los últimos 10 años.

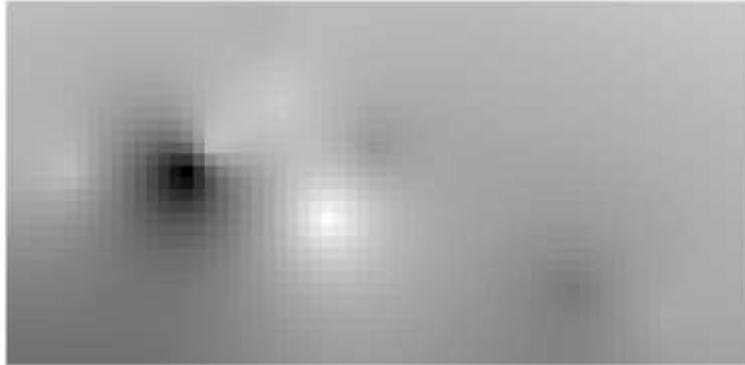


Figura 6-18 Interpolación correspondiente al mes de ENERO.

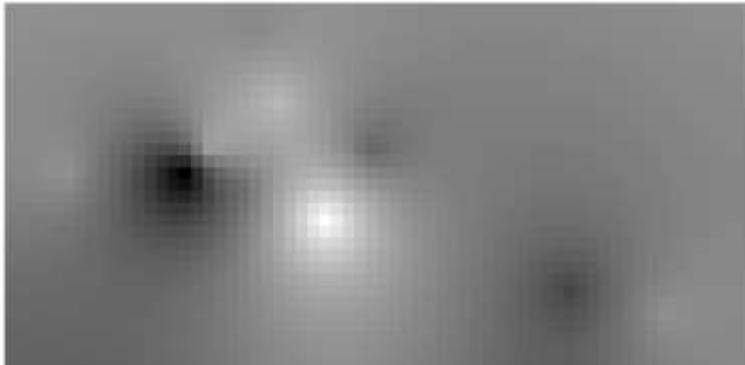


Figura 6-19 Interpolación correspondiente al mes de FEBRERO.

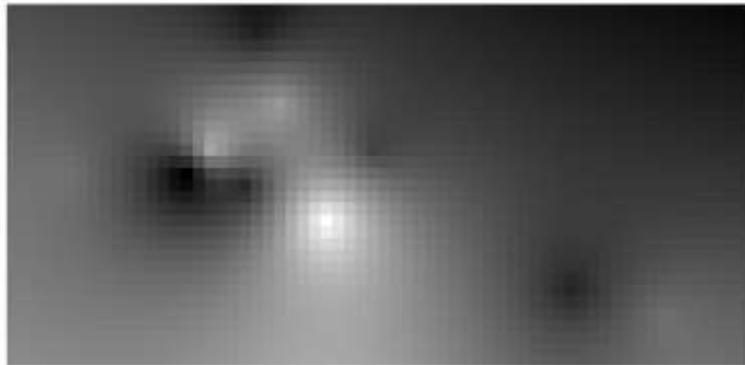


Figura 6-20 Interpolación correspondiente al mes de MARZO.

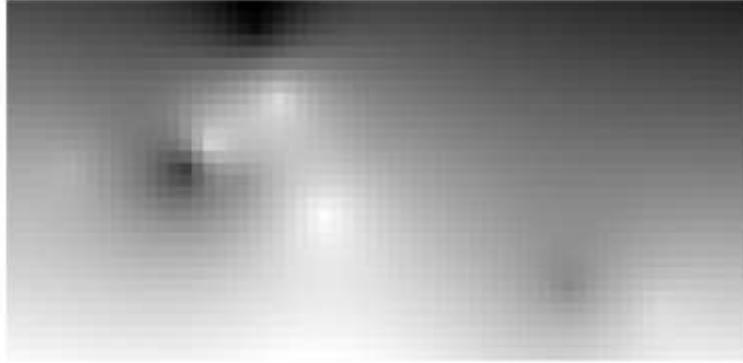


Figura 6-21 Interpolación correspondiente al mes de ABRIL.

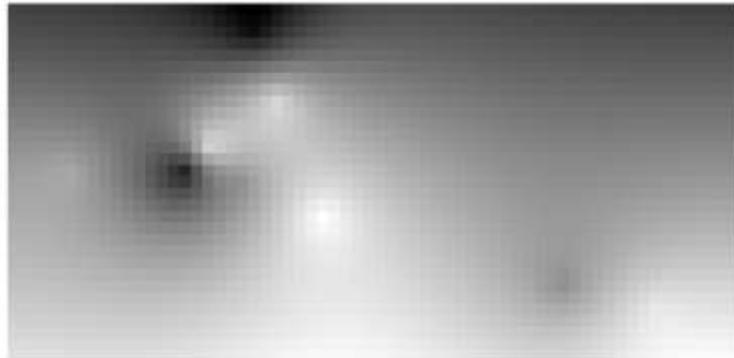


Figura 6-22 Interpolación correspondiente al mes de MAYO.

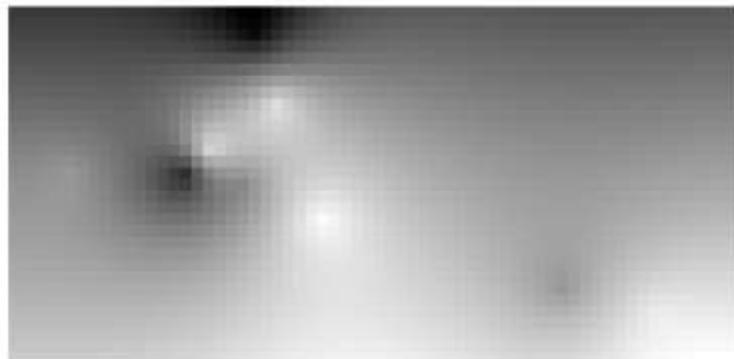


Figura 6-23 Interpolación correspondiente al mes de JUNIO.

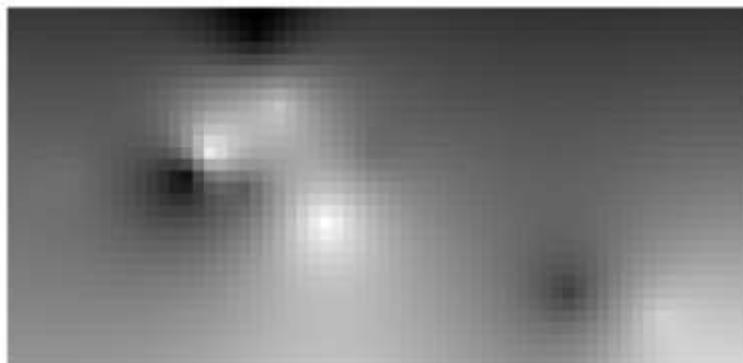


Figura 6-24 Interpolación correspondiente al mes de JULIO.

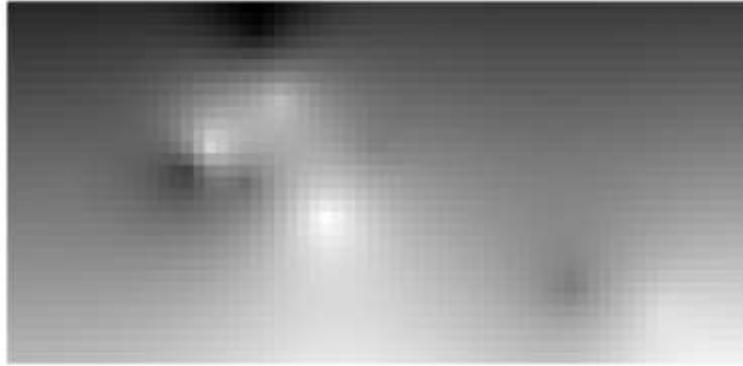


Figura 6-25 Interpolación correspondiente al mes de AGOSTO.

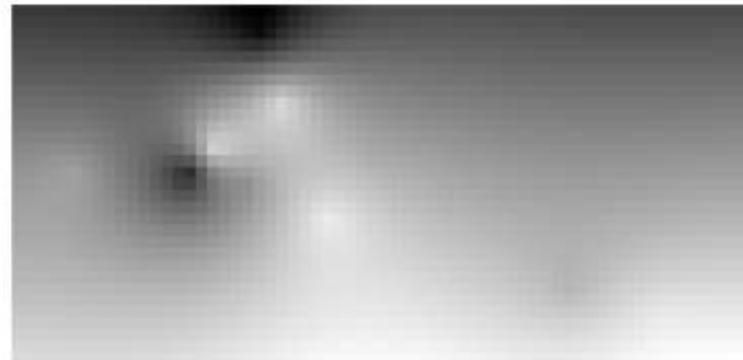


Figura 6-26 Interpolación correspondiente al mes de SEPTIEMBRE.

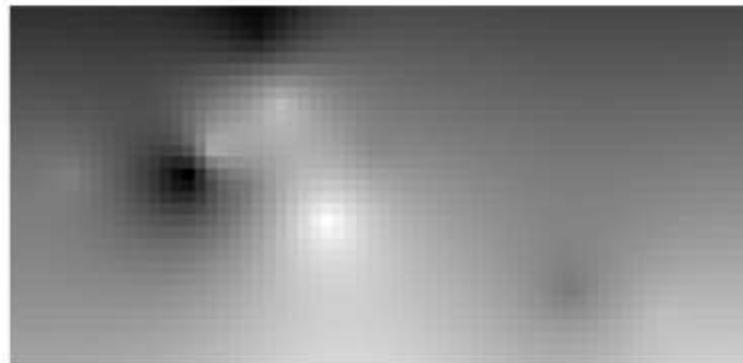


Figura 6-27 Interpolación correspondiente al mes de OCTUBRE.

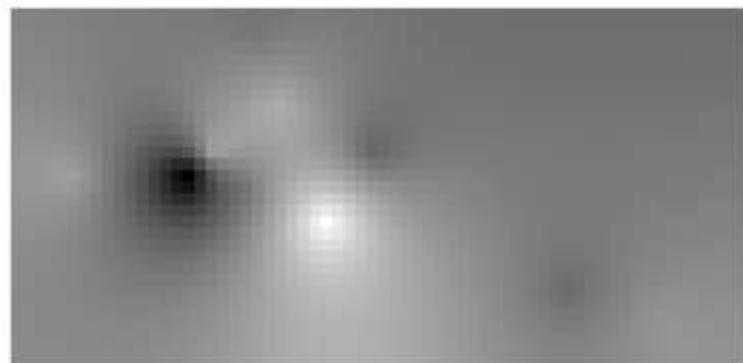


Figura 6-28 Interpolación correspondiente al mes de NOVIEMBRE.

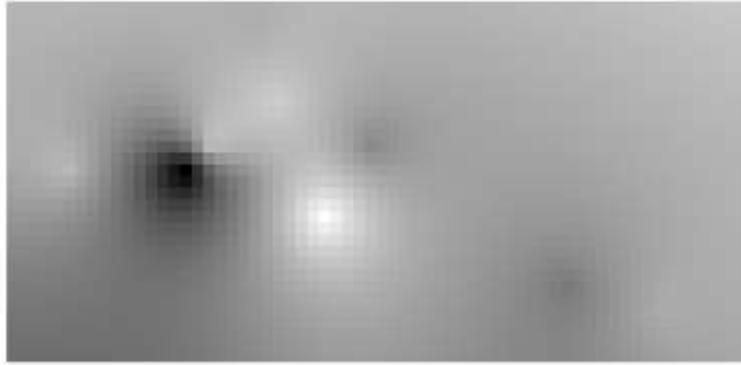


Figura 6-29 Interpolación correspondiente al mes de DICIEMBRE.

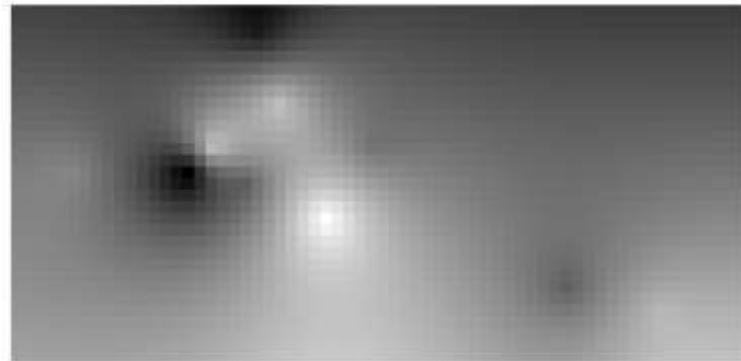


Figura 6-30 Interpolación promedio ANUAL

Los siguientes resultados muestran los promedios anuales de radiación solar desde el 2009 hasta el 2018.

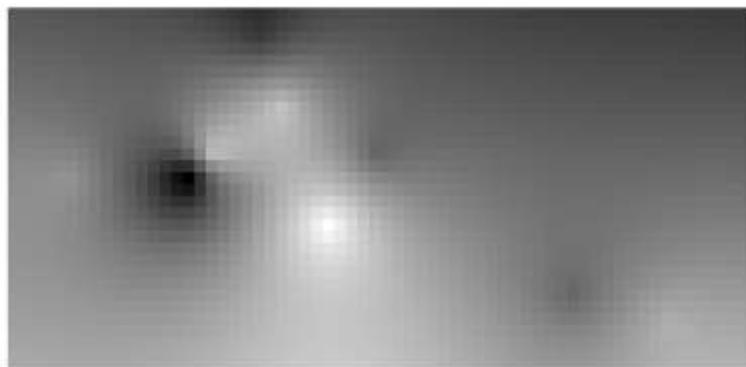


Figura 6-31 Interpolación correspondiente al año 2009.

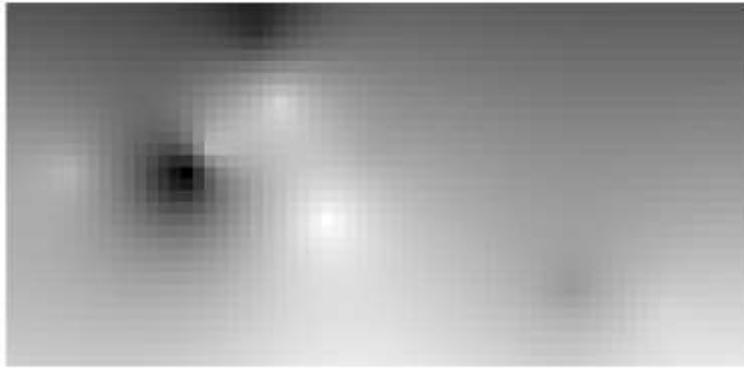


Figura 6-32 Interpolación correspondiente al año 2010.

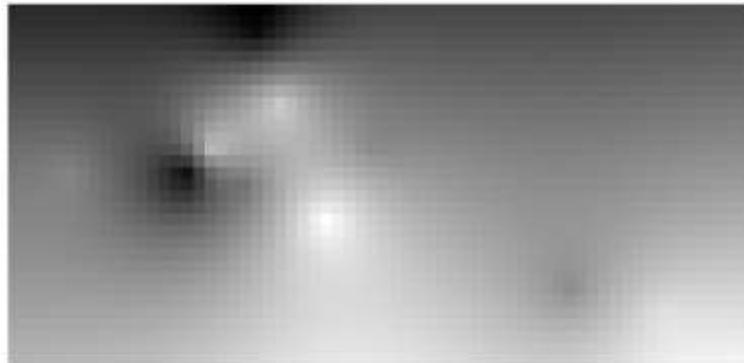


Figura 6-33 Interpolación correspondiente al año 2011.

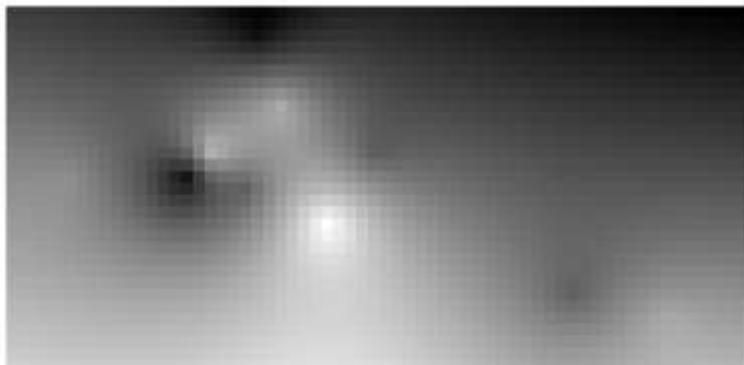


Figura 6-34 Interpolación correspondiente al año 2012.

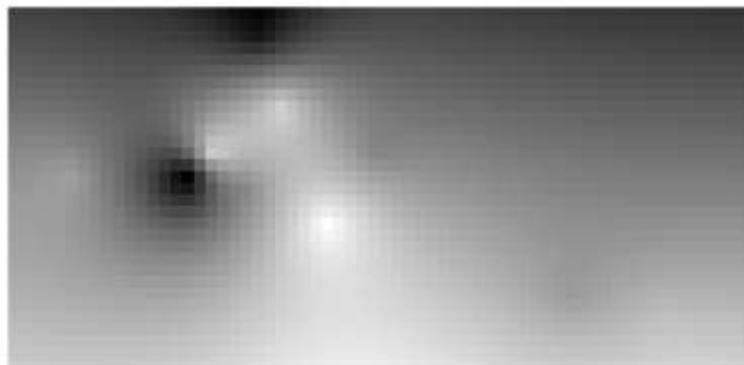


Figura 6-35 Interpolación correspondiente al año 2013.

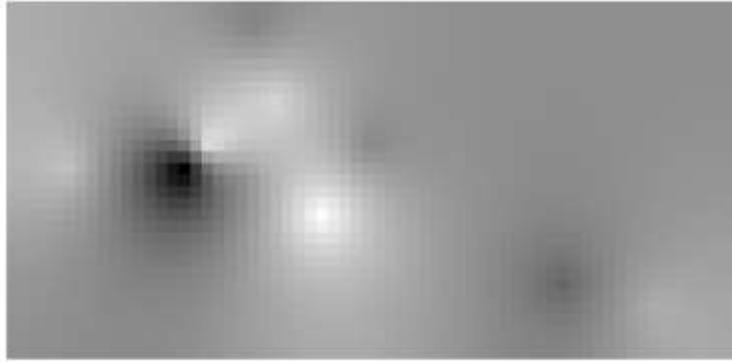


Figura 6-36 Interpolación correspondiente al año 2014.

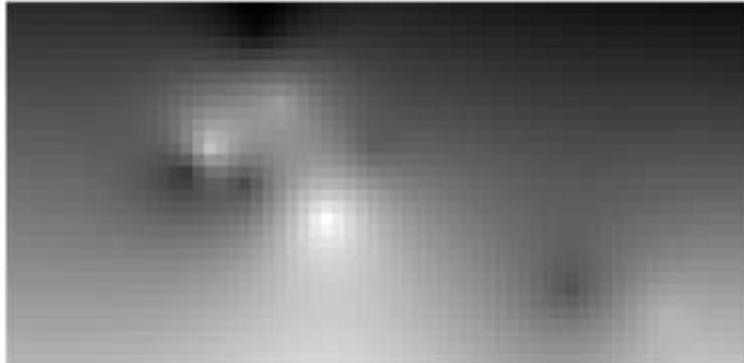


Figura 6-37 Interpolación correspondiente al año 2015.

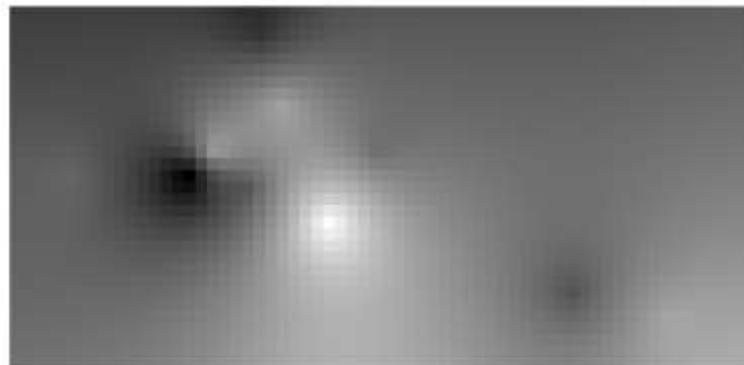


Figura 6-38 Interpolación correspondiente al año 2016.

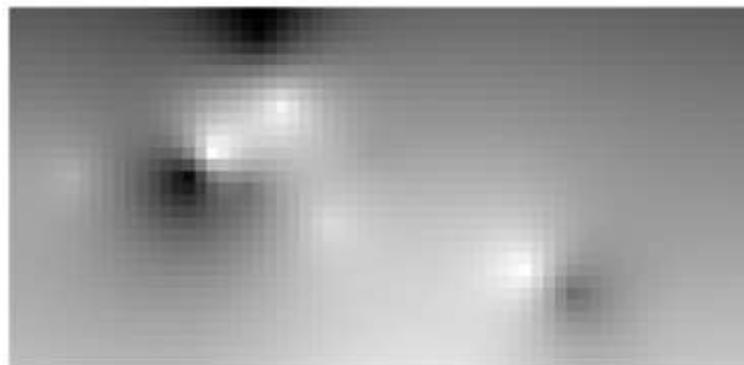


Figura 6-39 Interpolación correspondiente al año 2017.

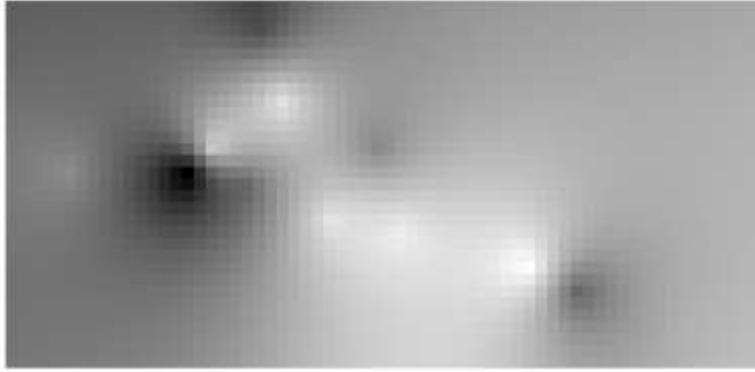


Figura 6-40 Interpolación correspondiente al año 2018.

6.5- Anexo E.

A continuación, se presentan los mapas anuales de los últimos diez años.

Mínimo
4.12

Máximo
5.81

Moda
4.81 – 4.95

[KWh/m²]

Error
14%

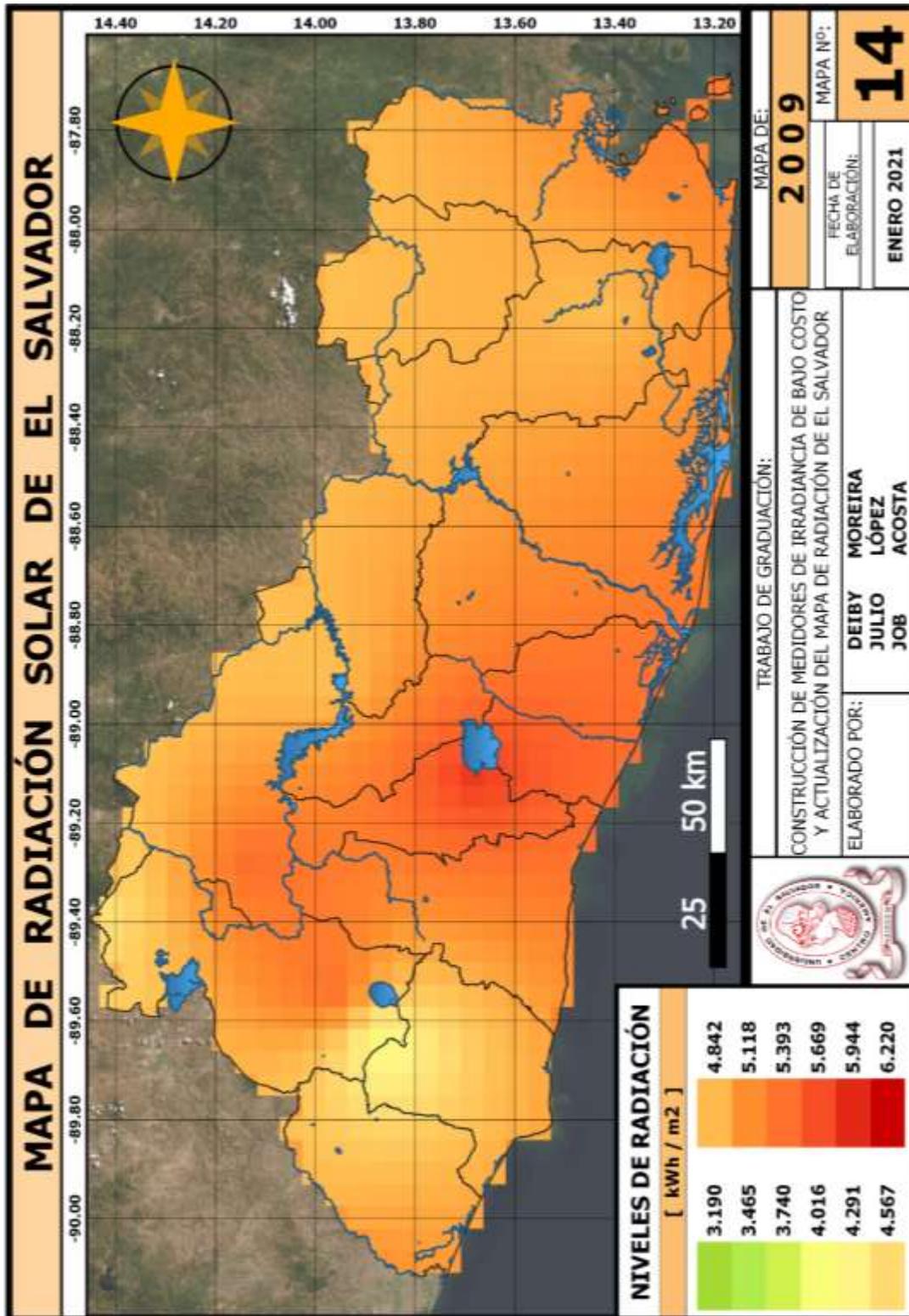


Figura 6-41 Mapa de radiación solar del 2009.

Mínimo
3.19

Máximo
5.64

Moda
4.73 – 5.02

[KWh/m²]

Error
23%

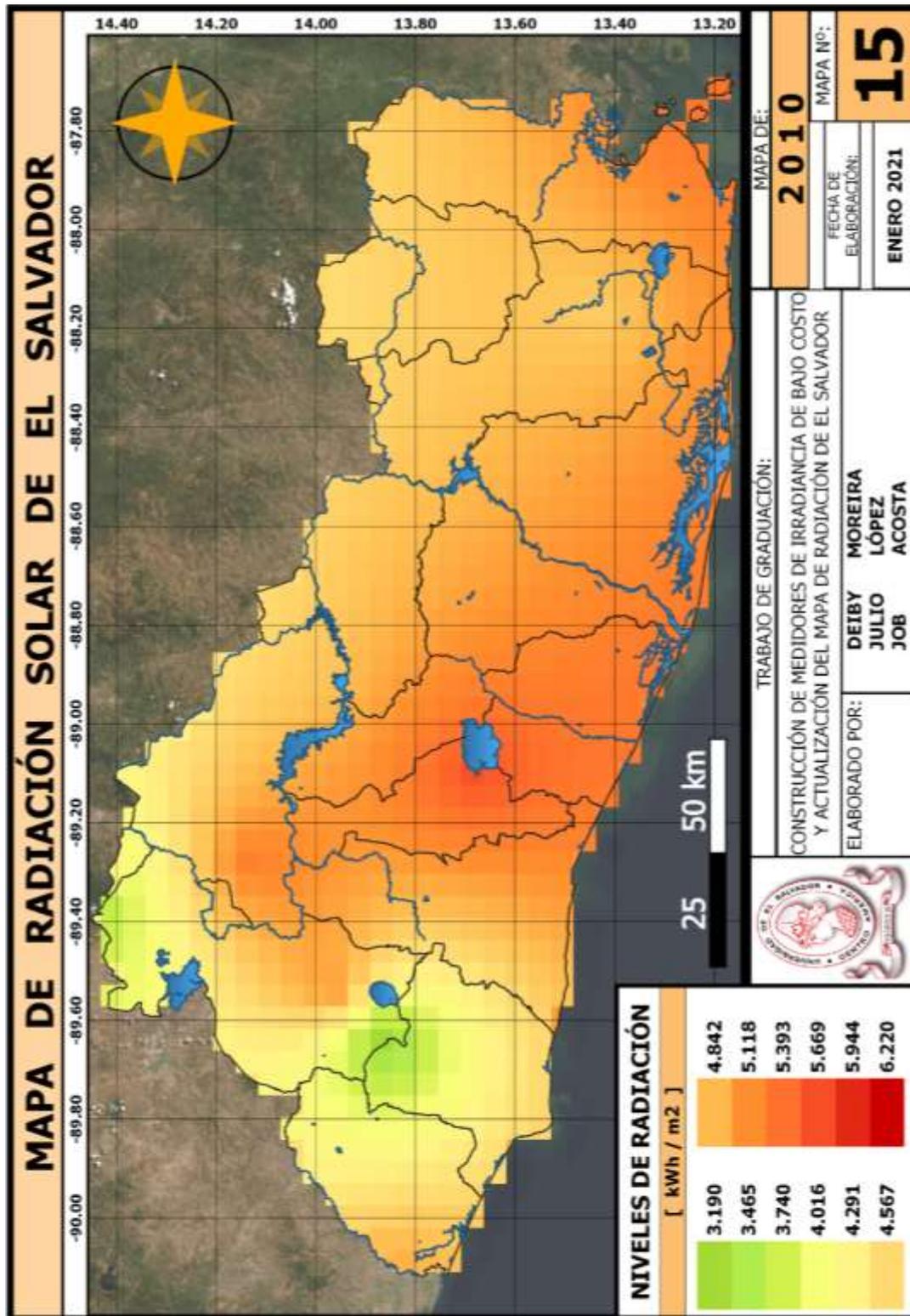


Figura 6-42 Mapa de radiación solar del 2010.

Mínimo
3.87

Máximo
5.46

Moda
4.78 – 4.89

[KWh/m²]

Error
16%

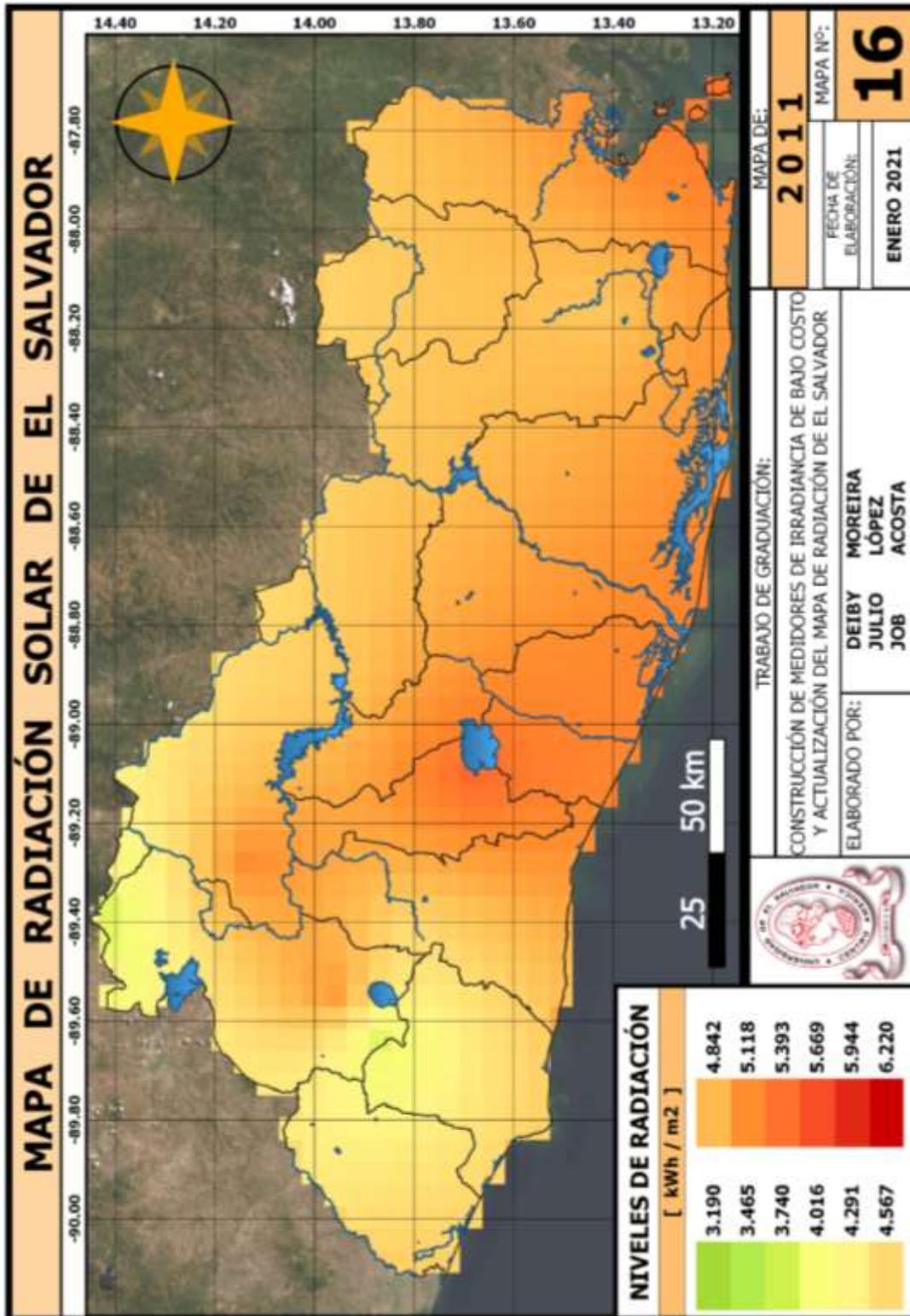


Figura 6-43 Mapa de radiación solar del 2011.

Mínimo
4.29

Máximo
5.82

Moda
4.81

[KWh/m²]

Error
14%

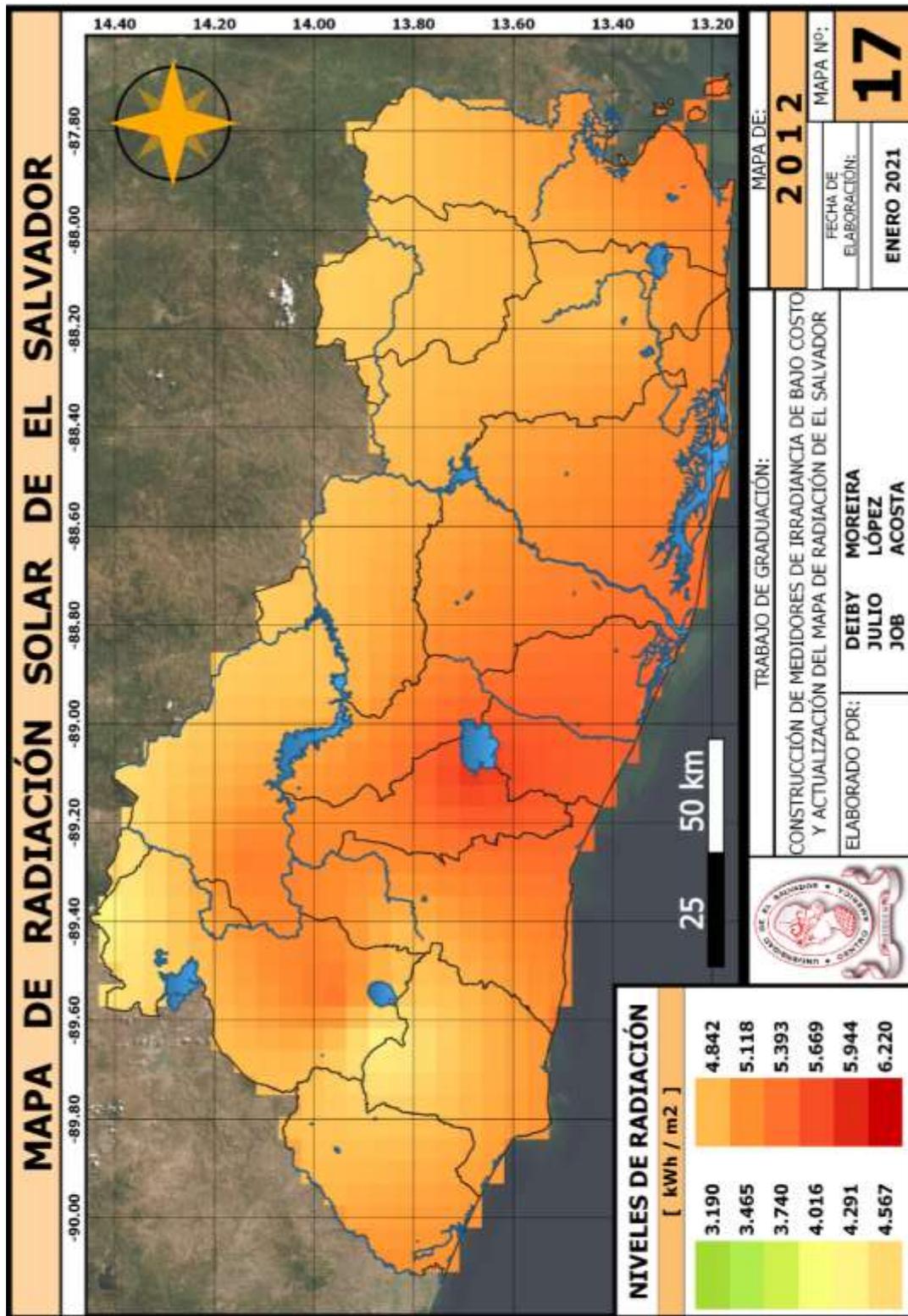


Figura 6-44 Mapa de radiación solar del 2012.

Mínimo
3.49

Máximo
5.46

Moda
4.63 – 4.64

[KWh/m²]

Error
19%

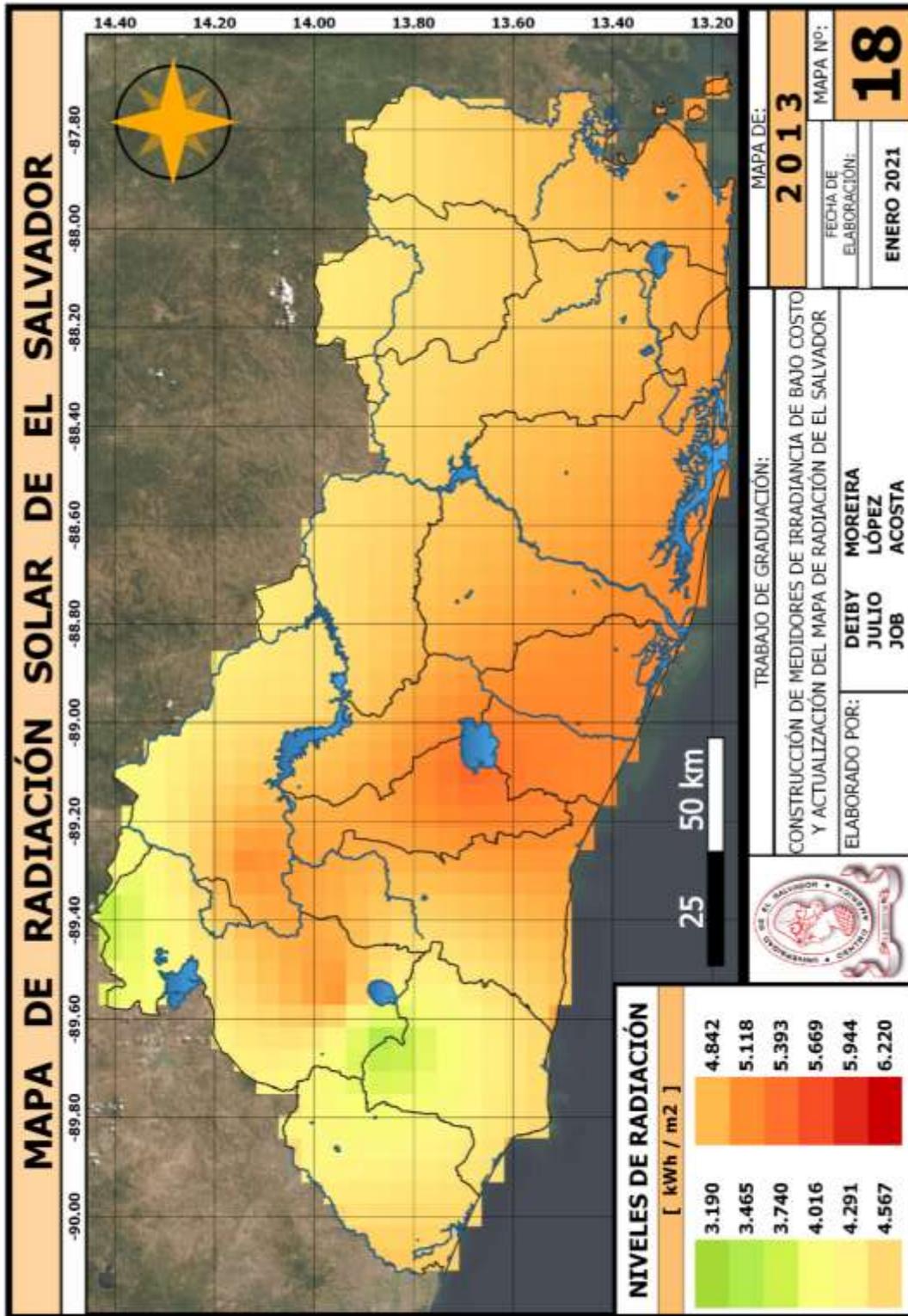


Figura 6-45 Mapa de radiación solar del 2013.

Mínimo

Máximo

Moda

4.82 – 4.84

[KWh/m²]

Error

15%

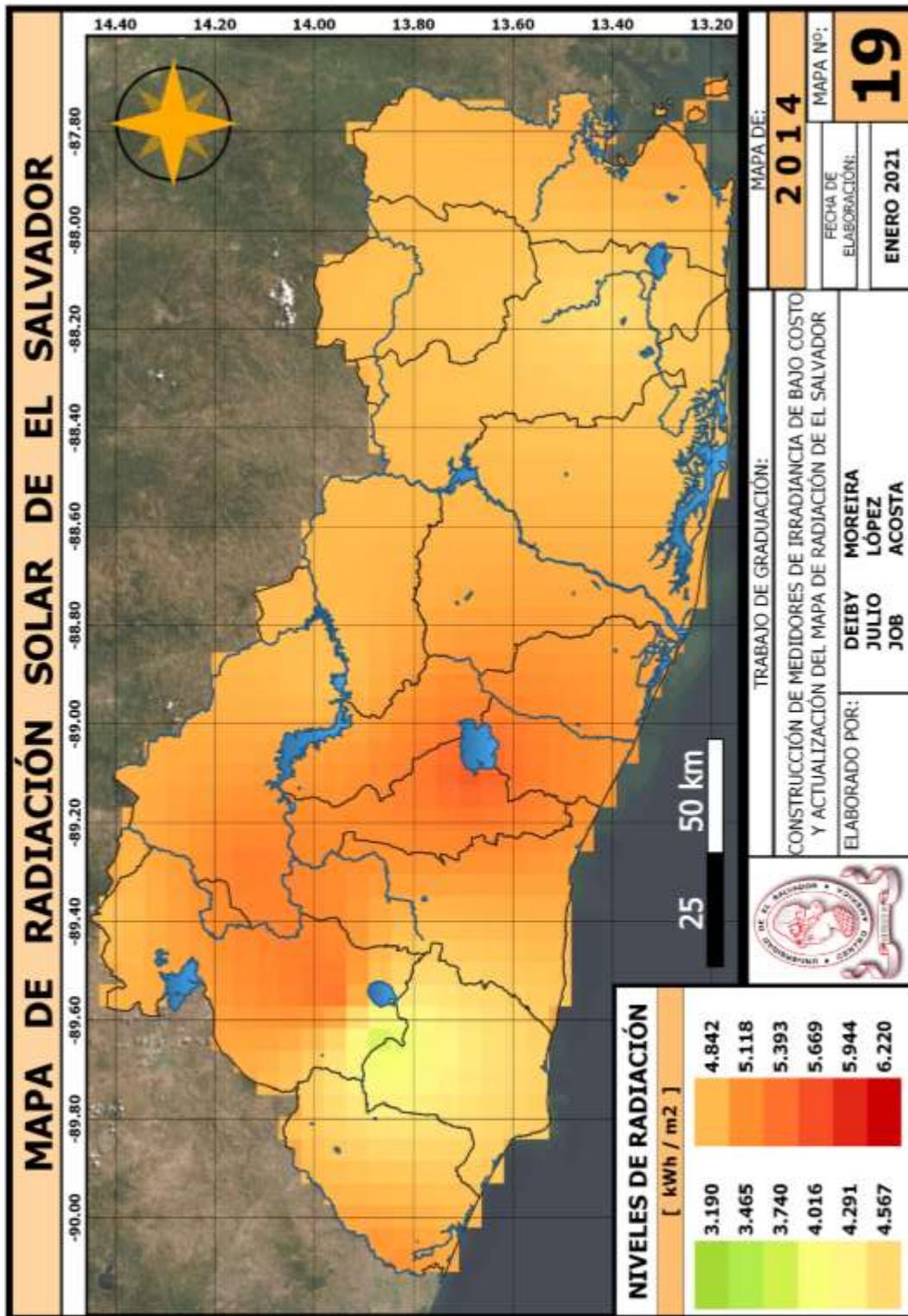


Figura 6-46 Mapa de radiación solar del 2014.

Mínimo
4.25

Máximo
5.85

Moda
4.78 – 4.85

[KWh/m²]

Error
14%

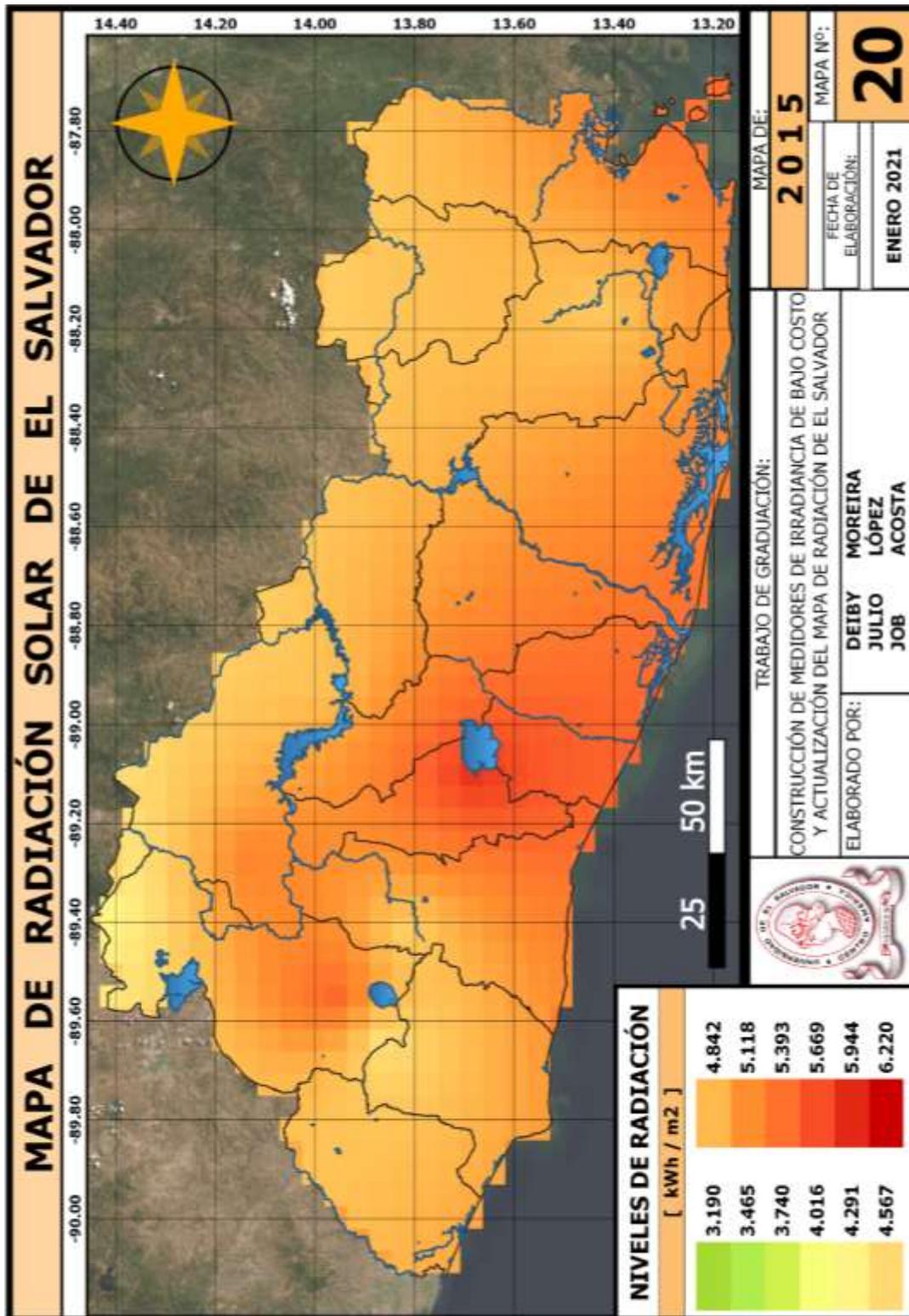


Figura 6-47 Mapa de radiación solar del 2015.

Mínimo
4.13

Máximo
5.62

Moda
4.79

[KWh/m²]

Error
12%

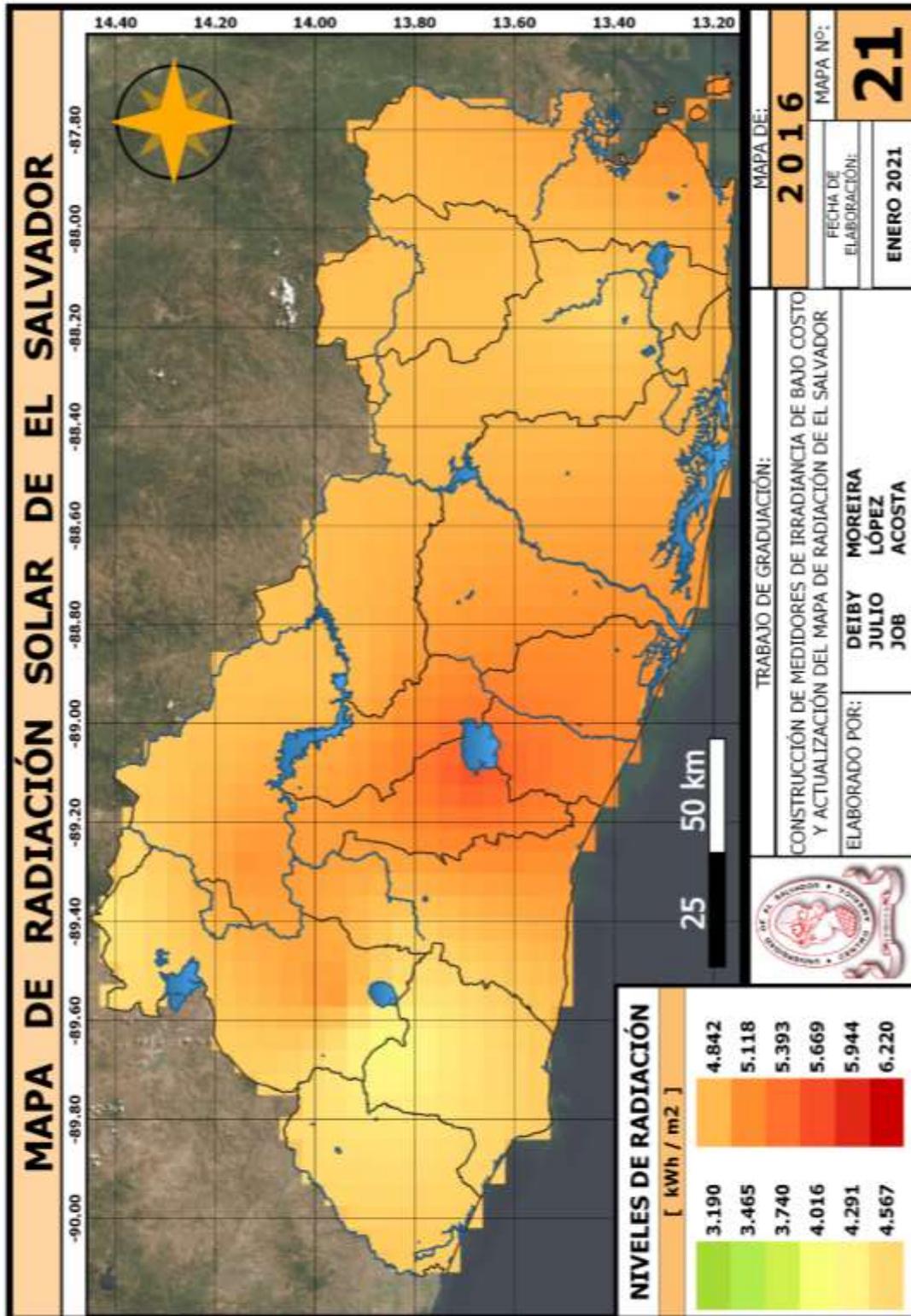


Figura 6-48 Mapa de radiación solar del 2016.

Mínimo
4.21

Máximo
5.31

Moda
4.86 – 4.87

[KWh/m²]

Error
13%

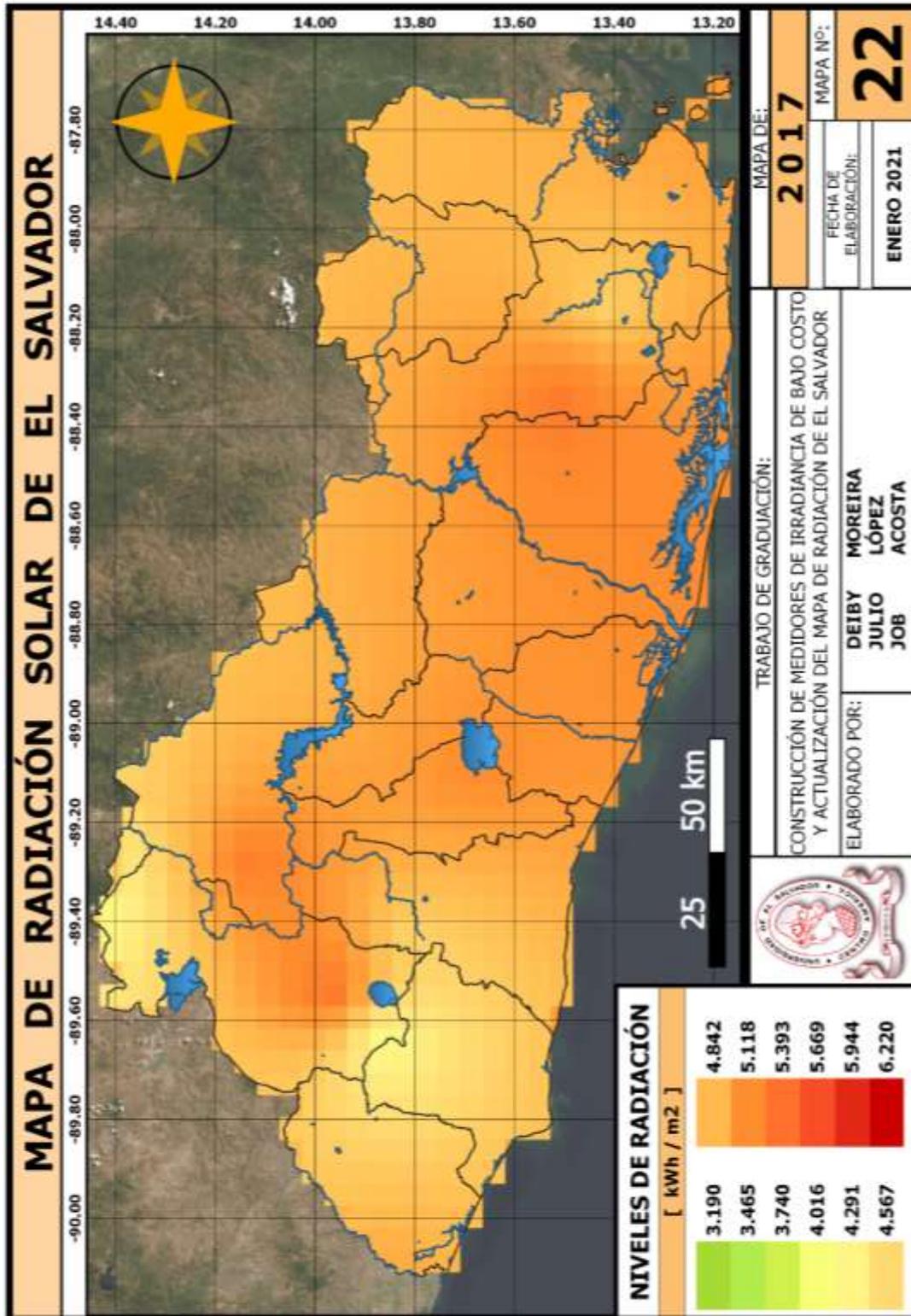


Figura 6-49 Mapa de radiación solar del 2017.

Mínimo
4.10

Máximo
5.36

Moda
4.96 – 4.97

[KWh/m²]

Error
11%

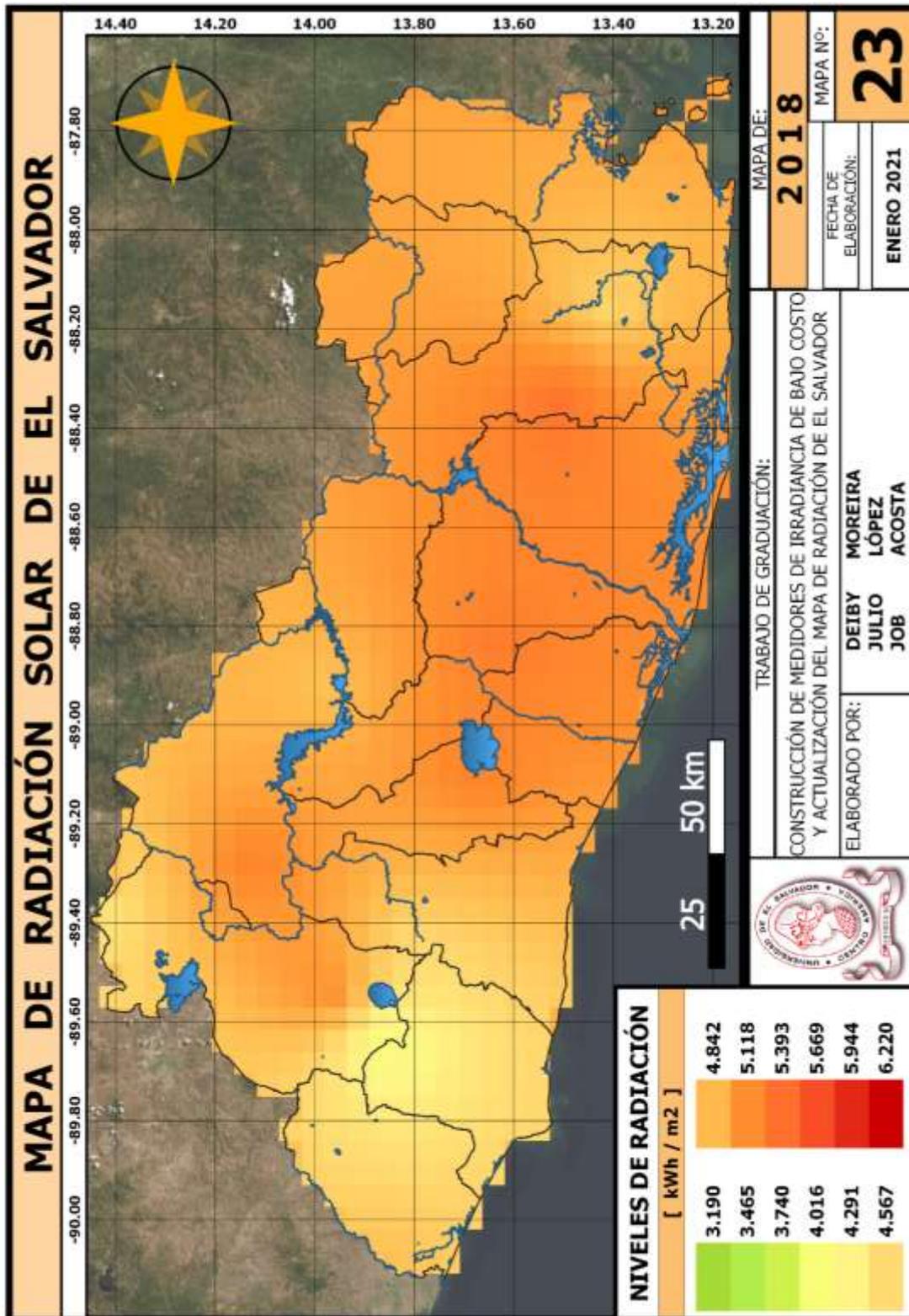


Figura 6-50 Mapa de radiación solar del 2018.

7-BIBLIOGRAFÍA.

NAUKAS: Los cinco movimientos de la tierra

Astronomía, 10 de julio 2010 por Milhaud

URL <https://naukas.com/2010/07/10/los-cinco-movimientos-de-la-tierra/>

Calefacción SOLAR: Tipos de energía solar

URL <http://calefaccion-solar.com/tipos-de-energia-solar.html>

HOGARSENSE: Energía solar pasiva: orígenes y aplicaciones

URL <https://www.hogarsense.es/energia-solar/energia-solar-pasiva>

ASI: El Salvador redujo a la mitad la generación de energía con petróleo en la última década

RLU <http://industriaelsalvador.com/2020/01/06/el-salvador-redujo-a-la-mitad-la-generacion-de-energia-con-petroleo-en-la-ultima-decada/>

Consejo Nacional de Energía

PLAN INDICATIVO DE LA EXPANSIÓN DE LA GENERACIÓN ELÉCTRICA DE EL SALVADOR 2019-2028

URL <http://estadisticas.cne.gob.sv/wp-content/uploads/2019/03/Plan-indicativo-de-la-generaci%C3%B3n-de-la-expansi%C3%B3n-2019-2028.pdf>

Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET)

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN)

URL <http://www.snet.gob.sv/SRT/>

Mapa de Sistema de Referencia Territorial (SNET)

URL <http://www.snet.gob.sv/Geologia/pcbbase2/parametros-mapa.php>

Registro de Datos en Estaciones Telemétricas (SNET)

URL <http://www.snet.gob.sv/Geologia/pcbbase2/parametros.php>

Actualización del Mapa de Radiación Solar de El Salvador

Tesis para optar por el título de: Ingeniero Eléctricista

Universidad de El Salvador, noviembre del 2014

Docente asesor: Msc. Jorge Alberto, Zetino Chicas

URL <http://ri.ues.edu.sv/6998/>

Geoportal del Centro Nacional de Registros

Mapa oficial de la República de El Salvador y el mapa en relieve

Fecha de publicación de la información en el sitio Web: 30 noviembre, 2015

Fecha de actualización de la información en el sitio Web: 16 octubre, 2019

URL <http://www.cnr.gob.sv/geoportal-cnr/>

ArcGIS for Desktop

Comprender el análisis de interpolación

URL <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/understanding-interpolation-analysis.htm>

ArcGIS for Desktop

Conceptos del conjunto de herramientas interpolación de ráster

Cómo funciona IDW

URL <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-idw-works.htm>

ArcGIS for Desktop

Conceptos del conjunto de herramientas interpolación de ráster

Cómo funciona Kriging

URL <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>

Cuáles son los tipos de archivos cartográficos en ArcMap

Geoinnova Formación SIG y Medio Ambiente

URL <https://geoinnova.org/cursos/cuales-son-los-tipos-de-archivos-cartograficos-en-arcmap/>

Métodos de interpolación de puntos

Alonso 2006-02-13

URL <https://www.um.es/geograf/sigmur/temariohtml/node43.html>

Surface Documentación GMT 6.0

© Copyright 2020, El equipo de GMT. Última actualización el 16 de enero de 2020.

Construido con Sphinx usando un tema proporcionado por Read the Docs .

URL <https://docs.generic-mapping-tools.org/latest/surface.html>

ARISTASUR: Sistema de coordenadas geográficas: UTM

URL <https://www.aristasur.com/contenido/sistema-de-coordenadas-geograficas-utm>

Clima de El Salvador. Lluvias tropicales en verano

URL <https://www.clima-de.com/elsalvador/>

8-CRÉDITOS DE IMÁGENES

8.1- CAPÍTULO I

Figura-1.1 Movimiento de Rotación

<https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwih1dyF2tPkAhUQLK0KHU2RDcUQjRx6BAGBEAQ&url=https://www.educa.madrid.org/web/fies.alonsoquijano.alcala/imagenes/26cd/26ved/3D/26url/3Dhttp/253A/252F/252Fwww.educa.madrid.org/web/fies.alonsoquijano.alcala/imagenes/26cd/26ved/3D/26url/3Dhttp/253A/252F/252Fpartamentos/252Fccnn/252FCCNN-1-2-ESO/252F1eso-15-16/252FLibro-02/252FTEMA-08-El-Universo-La-Tierra/252FTEMA-08-El-Universo-La-Tierra.html/26psig/3DAOVvaw2-QNnWY-A8iz-kBwadW-9/26ust/3D1568666622380003&psig=AOvVaw2-QNnWY-A8iz-kBwadW-9&ust=1568666622380003>

Figura-1.2 Movimiento de Traslación

<https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwj9vXM2tPkAhURP6wKHSzKDvQQjRx6BAGBEAQ&url=https://www.fogeografia2quintob09092013.wordpress.com/2013/09/21/2Fpractica-2-movimientos-de-la-tierra/2F&psig=AOvVaw2CeFx-krd3kq-ufqXFY-eo&ust=1568667104980583>

Figura-1.3 Movimiento de Precesión de los equinoccios

https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwjl-ui929PkAhUOna0KHf9kCOMQjRx6BAGBEAQ&url=https://www.recuerdosdepondora.com/2018/01/21/2Fciencia/2Fastronomia/2Fprecesion-de-los-equinoccios-estrella-polar/2F&psig=AOvVaw0IQysSaobe_mK44jIWG3T8&ust=1568667364309068

Figura-1.4 Movimiento de Nutación

<https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwju07zb2dPkAhUFeKwKHZ5hCPIQjRx6BAGBEAQ&url=https://www.weekend.perfil.com/noticias/informativo/2018-01-21-56971-tres-movimientos-desconocidos-que-hace-la-tierra.phtml&psig=AOvVaw2-QNnWY-A8iz-kBwadW-9&ust=1568666622380003>

Figura-1.5 Movimiento del Bamboleo de Chandler

<https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwiYmuH-29PkAhVPKa0KHZHIBZwQjRx6BAGBEAQ&url=https://www.naukas.com/2010/07/2F07/2F10/2Flos-cinco-movimientos-de-la-tierra/2Fgrafica-del-bamboleo-de-chandler/2F&psig=AOvVaw0Eoo4f8UcU78-cVPNFnJ87&ust=1568667501926216>

Figura- 1.7 Energía solar fotovoltaica

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww2.ineel.mx%2Fproyectorfotovoltaico%2Fpreg_06.html&psig=AOvVaw22rdJx0B9c4iIF_V1ZU_ZN&ust=1590517982019000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCICy-LLUz-kCFQAAAAAdAAAAABAD

Figura-1.8 Energía solar térmica

https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fbiosolenergia.com%2Fenergia-solar-termica%2F&psig=AOvVaw08D_tH-q97xoyHYVYsd8yV&ust=1590518201331000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCKis4qDWz-kCFQAAAAAdAAAAABAP

Figura-1.9 Energía solar híbrida

<https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww.balner.es%2Fenergias%2Ffotovoltaica%2Finsthibridas.htm&psig=AOvVaw1fyvzCpDCL6XSpclOCK8Px&ust=1590518883927000&source=images&cd=vfe&ved=0CAIQjRxqFwoTCOjcwFLWz-kCFQAAAAAdAAAAABAE>

8.2- CAPÍTULO II

Figura 2-1 Piranómetro Second Class

https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwilij_v27dPkAhVM-qwKHTj7DBEQjRx6BAgBEAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.campbellsci.es%2Fip02&psig=AOvVaw3vsuW7cl1IJM8ZHC3gLY11&ust=1568672319383107

Figura 2-2 Amplificador de Instrumentación AD625

https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwiS3--x7tPkAhVNSq0KHbnTA_4QjRx6BAgBEAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ebay.com%2Fitm%2F1x-AD625KN-Programmable-Gain-Instrumentation-Amplifier-AD625-%2F121275134075&psig=AOvVaw2GgYuSfsPtIJLILC89XrG&ust=1568672443279844

Figura 2-3 Arduino ATmega2560

https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwix352_79PkAhULX60KHeAvDowQjRx6BAgBEAQ&url=https%3A%2F%2Ftienda.bricogeek.com%2Farduino%2F306-arduino-mega-2560.html&psig=AOvVaw1Z3sREQFYQ5nX9BxV5MBbX&ust=1568672739721507

Figura 2-4 Arduino ATmega2560 más Shield Ethernet

<https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwjlwb-O8NPkAhUCQ60KHQ60DTIQjRx6BAgBEAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.sainsmart.com%2Fproducts%2Fsainsmart-mega2560-ethernet-shield-kit-for-arduino-atmega8u2-w5100&psig=AOvVaw0mUMWPsDT2gq8ZHrdpJ-T6&ust=1568672905967503>

Figura 2-13 Real Time Clock DS3231

<https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwiBvsWL8dPkAhUIQq0KHeLpBw4QjRx6BAgBEAQ&url=https%3A%2F%2Fpotentiallabs.com%2Fcart%2Fbuy-ds3231-rtc-module-hyderabad-online-india&psig=A0vVaw0hFo8PhA9cMGtjJdV1eDcf&ust=1568673145678647>

Figura 2-15 Regulador de voltaje L7805CT

https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKEwvjv1uqj8tPkAhVLOK0KHycDBX8QjRx6BAgBEAQ&url=https%3A%2F%2Farticulo.mercadolibre.com.mx%2FMLM-623722188-circuito-integrado-l7805ct-regulador-de-voltaje-5v-1amp-_JM&psig=A0vVaw0T_rqB3nLnrDOK36rXyN3S&ust=1568673360168490

8.3- CAPÍTULO III

Figura 3-1 Red Meteorológica de El Salvador (SNET).

<http://www.snet.gob.sv/SRT/zoom/map.php?mapa=meteorologica%2F>

Figura 3-11 Interpolación mediante Distancia Inversa Ponderada.

https://www.pngkey.com/png/detail/252-2521397_the-elevation-is-the-inverse-distance-weighted-mean.png

Figura 3-12 Interpolación mediante Kriging.

<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/GUID-6A643B32-4C6F-443F-9E73-89929AC53BA5-web.gif>

8.4- CAPÍTULO IV

Figura 4.43 Zonas geográficas de El Salvador.

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/El_Salvador_Mapa_por_Zonas_Geogr%C3%A1ficas.png