

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

GENERACIÓN DE UN MAPA PARA LA UBICACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN ZONAS URBANAS A PARTIR DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por la Br.:
Pérez Cáceres, Ana Gabriela
Para optar al Título de
Ingeniero Geodesta

Caracas, 2016

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

GENERACIÓN DE UN MAPA PARA LA UBICACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN ZONAS URBANAS A PARTIR DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Julián García

COLABORADOR: Prof. Victor Vilachá

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

Por la Br.:

Pérez Cáceres, Ana Gabriela

Para optar al Título de

Ingeniero Geodesta

Caracas, 2016

ACTA

El día 29 de julio 2016 se reunió el jurado formado por los profesores:

Julian A. Garcia Q.
Argenis LUZO
VICTOR J. Guaiara H.

Con el fin de examinar el Trabajo Especial de Grado titulado: **“GENERACIÓN DE UN MAPA PARA LA UBICACIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS EN ZONAS URBANAS A PARTIR DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN”**.

Presentado ante la Ilustre Universidad Central de Venezuela para optar al Título de: **INGENIERO GEODESTA**.

Una vez oída la defensa oral que la bachiller Ana Gabriela Pérez Cáceres hizo de su Trabajo Especial de Grado, este jurado decidió las siguientes calificaciones:

NOMBRE	CALIFICACIÓN	
	Número	Letra
Br. Ana G. Pérez C.	20	veinte

Recomendaciones:

FIRMAS DEL JURADO

[Firma]
[Firma]
[Firma]

Caracas, 29 de Julio de 2016

DEDICATORIA

A Dios por darme la fe, fortaleza, paciencia y salud para culminar con este proyecto y con mis estudios.

A mis padres y a toda mi familia, por el apoyo incondicional a lo largo de todo este tiempo, darme la fortaleza necesaria para seguir con mi compromiso de la culminación de mis estudios, a demás de acompañarme siempre y ayudarme a formarme como la persona que soy hoy en día.

A mi tutor y mi colaborador, profesores de admirar Julián García y Victor Vilachá, por acompañarme en la elaboración de este proyecto y siempre motivándome a culminar el mismo, y sobre todo por ser guías soportándome en este tiempo del desarrollo y finalización del trabajo.

A mis amigos y amigas por apoyarme siempre y darme el ánimo que necesitaba en mis momentos de desfallecimiento y haberme brindado sus mejores deseos.

AGRADECIMIENTOS

A la ilustre Universidad Central de Venezuela, por acobijarme y permitir cursar mis estudios de pregrado en sus amplios y espectaculares espacios.

Al Prof. Julián García, por haber sido mi tutor y un guía a lo largo de este trabajo; aparte de ser un excelente y admirable profesor el cual compartió sus valiosos conocimientos de gran importancia para mí a lo largo de mis estudios.

A mi colaborador el Prof. Victor Vilachá, por su contribución que impulsó a continuar con mi compromiso en realizar y finalizar este trabajo. A demás de ser un notable profesor que brindó sus experiencias y conocimientos de gran interés y ayuda para el seguimiento y culminación de mi carrera.

A todos mis compañeros del Departamento de Geodesia, por acompañarme y darme innumerables aportes y su apoyo cuando más lo necesitaba, los cuales fueron de vital importancia para poder continuar con mi compromiso con este trabajo y así terminar satisfactoriamente. En especial a aquellos que siempre estuvieron con su apoyo en ciertos momentos de desaliento, como Nataly Viloría, María Fernanda Pineda, Yoreyma Castellanos y mi compañera a lo largo de toda mi carrera Sthefanie González.

A todos los profesores de Geodesia, por haber siempre estado en seguimiento con mi trabajo especial de grado, las numerosas aportaciones que dieron lugar a adentrarme aún más en mi trabajo siendo más que un apoyo, también guías y compañeros a lo largo de este trabajo. Agradecida por haber compartido sus valiosos conocimientos y experiencia conmigo.

Pérez C., Ana G.

**GENERACIÓN DE UN MAPA PARA LA UBICACIÓN DE SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS EN ZONAS URBANAS A PARTIR DE UN
MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN**

Tutor Académico: Prof. Julián García

Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.

Escuela de Ingeniería Civil. 2016, 292 páginas.

Palabras Clave: Fotogrametría, Modelo Digital de Elevación, Dron, Energía Solar, Sistema Fotovoltaico, Ahorro Energético.

Resumen

El desarrollo de las fuentes de energía renovables puede contribuir a la reducción de la contaminación a demás de poder utilizar recursos energéticos propios.

Venezuela siendo el país con el consumo eléctrico más alto de Latinoamérica por habitante, nos resulta conveniente diseñar un modelo geográfico que nos dé la oportunidad de considerar y evaluar el posible uso de una fuente de energía limpia y segura con una buena productividad y rentabilidad; lo que nos lleva a la obtención de una representación gráfica de posibles espacios potencialmente utilizables para la colocación de sistemas alternativos, como es sistemas

fotovoltaicos para el uso racional de la electricidad, la mejora de la eficiencia en las instalaciones y la utilización de energías renovables.

Las investigaciones para desarrollar el sector de las energías renovables han crecido a través de los años, y una de las fuentes de energía con potencial y a demás gratuita que cubre las necesidades energéticas de la población es la energía solar.

Se plantea el estudio de factibilidad en la implementación de sistemas fotovoltaicos para reducir el consumo de energía eléctrica en una parte seleccionada de la Ciudad Universitaria de la U.C.V. El análisis realizado se apoyará principalmente en un modelo urbano en 3D generado a partir de imágenes captadas a través de una cámara por un vehículo aéreo no tripulado (Dron) utilizando como herramienta para el tratamiento de los mismos los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Para el desarrollo y generación del modelo se utilizó el software ArcGis 10.1®, el cual resulta ser una herramienta muy útil diseñada para el apoyo de la elaboración de este modelo temático y así cumplir con los objetivos planteados.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.1 Planteamiento del problema	4
1.2 Justificación.....	5
1.3 Marco referencial.....	5
1.4 Objetivos	8
1.4.1 Objetivo General.....	8
1.4.2 Objetivos Específicos	8
CAPITULO II. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 La Fotogrametría	9
2.1.1 Definición de la fotogrametría	9
2.1.2 Clasificación de la fotogrametría.....	10
2.1.2.1 La fotogrametría geométrica	10
2.1.2.2 La fotogrametría analógica.....	10
2.1.2.3 La fotogrametría analítica.....	11
2.1.2.4 La fotogrametría digital.....	11
2.2 Fotogrametría Digital	12
2.2.1 Aspectos y consideraciones del desarrollo de la fotogrametría digital	12
2.2.2 La imagen digital	14
2.2.3 Formatos más comunes de imagen digital	14
2.2.4 El Pixel	15

2.2.5	Fases para el desarrollo de la fotogrametría digital	16
2.2.6	Ventajas y desventajas de la fotogrametría digital	18
2.3	Técnicas y métodos para el proceso de la Fotogrametría	19
2.3.1	Planificación del vuelo	20
2.3.1.1	Mapa de vuelo	22
2.3.1.2	Los parámetros del vuelo	23
2.3.1.3	Especificaciones técnicas	26
2.3.2	Vuelo	27
2.3.2.1	Condiciones para la toma de fotografías aéreas	27
2.3.2.2	Métodos de navegación fotográfica	28
2.3.2.2.1	Navegación a simple vista con cartografía disponible	28
2.3.2.2.2	Navegación a simple vista sin cartografía previa	28
2.3.2.2.3	Sistema de navegación avanzada	31
2.3.3	Control Terrestre (Puntos de Apoyo)	32
2.3.3.1	Número y distribución de los Puntos de Apoyo Fotogramétricos	34
2.3.3.2	Elección de los Puntos de Apoyo Fotogramétricos	36
2.3.3.3	Preseñalización de los Puntos de Apoyo	37
2.3.3.4	Control terrestre con Puntos Naturales	39
2.3.3.5	Documentos a generar	40
2.3.4	Aerotriangulación	42
2.3.4.1	Fases de la Aerotriangulación	44
2.3.4.2	Clasificación de los métodos de la aerotriangulación	48
2.3.4.3	Aplicaciones de la aerotriangulación	50

2.3.5	Orientación de las Fotografías Externa e Interna como parte del proceso fotogramétrico.....	52
2.3.5.1	Geometría Epipolar (normalización de imágenes)	57
2.3.5.2	Remuestreo	59
2.3.6	Correlación Automática	61
2.3.6.1	Métodos de correlación automática	62
2.3.6.2	Estrategias de correlación automática.....	65
2.3.7	Generación automática de Modelos Digitales de Terreno (MDT).....	67
2.3.7.1	Métodos de interpolación	70
2.4	Modelos Digitales de Terreno y sus derivados	70
2.4.1	Concepto de Modelo	71
2.4.2	Modelo Digital de Terreno (MDT).....	72
2.4.2.1	Concepto de MDT	72
2.4.2.2	Origen del MDT	73
2.4.2.3	Propiedades fundamentales de los Modelos Digitales de Terreno.....	74
2.4.3	Modelo Digital de Elevación (MDE)	75
2.4.3.1	Definición de MDE	75
2.4.3.2	Estructura de datos en el MDE	75
2.4.3.3	Métodos de captura de datos para generar el MDE.....	79
2.4.3.4	Comprobación de la Calidad de los MDE	83
2.4.4	Modelo Digital de Superficie (MDS).....	85
2.5	El Dron y sus aplicaciones.....	85
2.5.1	Definición de dron o VANT.....	85
2.5.2	Clasificación de Aeronaves	87

2.5.3	Modos de operación	88
2.5.3.1	Modo Manual	88
2.5.3.2	Modo Asistido	88
2.5.3.3	Modo Automático.....	89
2.5.3.4	Modo Autónomo	89
2.5.4	Plan de Vuelo	90
2.5.4.1	Diseño del modelo del plan de vuelo	90
2.5.5	Obtención de datos	92
2.5.6	Proceso de Gabinete.....	93
2.5.7	Aplicación a la Cartografía	95
2.5.8	Aplicaciones Adicionales.....	97
2.5.8.1	El Modelo Digital de Elevación (MDE) y su utilidad como modelo base.....	98
2.5.9	Resultados Finales	99
2.6	Posición Solar.....	100
2.6.1	Movimiento de la Tierra	103
2.6.2	Movimiento del Sol	104
2.6.2.1	Recorrido aparente del Sol.....	105
2.6.3	Cartas Solares	108
2.7	Energía Solar.....	111
2.7.1	La constante Solar.....	111
2.7.2	Radiación Solar	112
2.7.2.1	Rayos Solares	112
2.7.2.2	La radiación climatológica	113

2.7.2.2.1	Rayos solares directos	113
2.7.2.2.2	Rayos difusos	113
2.7.2.2.3	Rayos cenitales	114
2.7.2.2.4	Rayos reflejados (albedo)	114
2.7.2.2.5	Radiación Global	114
2.7.3	Valoración de la radiación global	114
2.7.4	Comportamiento de la radiación solar	115
2.7.4.1	Intensidad de la radiación	115
2.7.5	Insolación.....	115
2.7.5.1	Duración de la insolación	116
2.7.6	La Irradiación Solar (Energía Solar).....	117
2.7.6.1	Diferencia entre irradiación e irradiancia solar.	119
2.8	Aprovechamiento Energía Solar.....	120
2.8.1	Los colectores solares.....	121
2.8.1.1	Colectores Heliotérmicos	121
2.8.1.2	Colectores Heliovoltaicos	122
2.8.2	Sistemas de Energía Solar Fotovoltaicas	122
2.8.2.1	Antecedentes.....	123
2.8.2.2	Tipos de Sistemas Fotovoltaicos	125
2.8.2.2.1	Sistemas Aislados	126
2.8.2.2.2	Sistemas conectados a la red	126
2.8.2.2.3	Sistemas conectados a la red con respaldo	127
2.8.2.2.4	Sistemas Híbridos	127

2.8.2.3	Componentes de los sistemas fotovoltaicos.....	128
2.8.2.4	Tecnología Fotovoltaica	132
2.8.2.4.1	La célula solar.....	132
2.8.2.4.2	Módulos Fotovoltaicos.....	133
2.8.2.4.3	Tipos de soportes	134
CAPITULO III. METODOLOGÍA.....		136
3.1	Selección de la zona de estudio	141
3.2	Datos de partida	142
3.3	Generación de cartografía base del proyecto a desarrollar a partir de la actualización.	151
3.4	Superficie de los techos disponibles.....	154
3.4.1	Criterios.....	154
3.4.2	Efecto por la inclinación	156
3.4.2.1	Función de la herramienta Slope (pendiente) en ArcGis 10.1	159
3.4.3	Efecto por la orientación.....	162
3.4.3.1	Función de la herramienta Aspect (orientación) en ArcGis 10.1.....	165
3.4.4	Efecto de la sombra de la zona estudio.....	168
3.4.5	Accesibilidad a los techos para mantenimiento de arreglos fotovoltaicos ..	179
3.4.6	Monumentos, edificios singulares y techos que no correspondan a edificios	184
3.4.7	Cálculo de superficies de los techos disponibles	187
3.4.7.1	Superficie total de techos útil	187
3.5	Determinación de la radiación solar	197
3.6	Potencia instalada por los módulos fotovoltaicos.....	201
3.7	Energía producida por los módulos fotovoltaicos.....	205

CAPITULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS	209
CAPITULO V. CONCLUSIONES	219
CAPITULO VI. RECOMENDACIONES.....	221
CAPITULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	222
CAPITULO VII. APÉNDICE	226

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. DISPOSICIÓN IDEAL PARA LOS FOTOGRAMAS.....	23
FIGURA 2. VUELO DE FRANJAS ENTRELAZADAS.....	30
FIGURA 3. DISTRIBUCIÓN DE LOS PUNTOS DE CONTROL TERRESTRE.....	34
FIGURA 4. DIVERSAS FORMAS DE PRESEÑALIZACIÓN	37
FIGURA 5. PUNTO NATURAL PARA EL CONTROL TERRESTRE.....	40
FIGURA 6. RESEÑA DE CAMPO DE LOS PUNTOS DE APOYO.....	42
FIGURA 7. A) PUNTOS DE CONTROL PLANIMÉTRICO Y ALTIMÉTRICOS	45
FIGURA 8. B) DISTRIBUCIÓN IDEAL DEL APOYO TOPOGRÁFICO (PUNTOS DE CONTROL).....	46
FIGURA 9. C) NUMERACIÓN DE PUNTOS DE LAS FOTOGRAFÍAS PARA EL PROCESO DE AEROTRIANGULACIÓN.....	46
FIGURA 10. D) GRÁFICO GENERAL DEL BLOQUE FOTOGRAMÉTRICO (MAPA ÍNDICE).....	47
FIGURA 11. ESQUEMA DE LA FASE DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS SEGÚN JORDAN EGGERT Y KNEISSAL	48
FIGURA 12. SISTEMA ESPACIAL DE COORDENADAS IMAGEN (x, y, z), SISTEMA DE COORDENADAS TERRENO/OBJETO (X, Y, Z) E IMÁGENES DE LOS PUNTOS A Y B EN EL POSITIVO (A, B) Y EN EL NEGATIVO (A', B'); PUNTO PRINCIPAL EN EL POSITIVO, O, Y EN EL NEGATIVO, O'.....	53
FIGURA 13. CONDICIÓN DE COPLANARIDAD Y ORIENTACIÓN RELATIVA	55
FIGURA 14. DISPOSICIÓN ESPACIAL DE PUNTOS HOMÓLOGOS A MEDIR PARA LA FORMACIÓN DEL MODELO: A) SELECCIÓN MANUAL; B) SELECCIÓN AUTOMÁTICA POR MEDIO DE TÉCNICAS DE CORRESPONDENCIA	55
FIGURA 15. ORIENTACIÓN ABSOLUTA DE UN MODELO	57
FIGURA 16. GEOMETRÍA EPIPOLAR: A) IMÁGENES ORIGINALES; B) IMÁGENES NORMALIZADAS	58
FIGURA 17. CONCEPTO DE CORRESPONDENCIA POR ÁREA: VENTANA DE REFERENCIA EN LA IMAGEN IZQUIERDA Y VENTANA DE BÚSQUEDA EN LA IMAGEN DERECHA.....	63
FIGURA 18. PROPIEDADES DE CADA FORMATO	76

FIGURA 19. CLASIFICACIÓN DE AERONAVES.....	88
FIGURA 20. POSICIÓN DEL SOL QUE SE DA TÍPICAMENTE COMO UN ÁNGULO DE AZIMUT Y ALTITUD	101
FIGURA 21. RUTA DEL SOL POR HORA (DESDE EL ORTO HASTA EL OCASO).....	102
FIGURA 22. RUTA DEL SOL ANUAL (DÍA 21 DE CADA MES).....	103
FIGURA 23. EQUINOCCIO AL MEDIODÍA. HEMISFERIO NORTE.....	105
FIGURA 24. SOLSTICIO DE VERANO E INVIERNO PARA EL HEMISFERIO NORTE	107
FIGURA 25. MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN DE LA TIERRA	107
FIGURA 26. CARTA SOLAR ESTEREOGRÁFICA. HEMISFERIO NORTE.....	109
FIGURA 27. CARTA SOLAR CILÍNDRICA EN EL HEMISFERIO NORTE. PARA LA CIUDAD UNIVERSITARIA, CARACAS - VENEZUELA.....	110
FIGURA 28. TIPOS DE RADIACIÓN SOLAR.....	118
FIGURA 29. IRRADIACIÓN SOLAR: ÁREA BAJO LA CURVA ENTRE LA IRRADIANCIA VS EL TIEMPO	119
FIGURA 30. VARIACIÓN EN LA PRODUCCIÓN Y REDUCCIÓN DE COSTOS DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS ANUALMENTE A NIVEL MUNDIAL	124
FIGURA 31. APLICACIONES DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	125
FIGURA 32. A) PROCESO DE FABRICACIÓN DE LAS CELDAS FOTOVOLTAICAS Y SU APLICACIÓN.....	129
FIGURA 33. B) PARTES QUE CONFORMAN EL MÓDULO FOTOVOLTAICO	129
FIGURA 34. C) COMPONENTES DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO (CELDA, MÓDULO, ARREGLO).....	130
FIGURA 35. CONJUNTO DE HERRAMIENTAS DISPONIBLES PARA SUPERPOSICIÓN DE RASTERS EN ARCGIS 10.1	139
FIGURA 36. MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE (MDS) DE LA ZONA A ESTUDIAR. PRODUCTO DE UN PROCEDIMIENTO FOTOGRAMÉTRICO A PARTIR DE FOTOGRAFÍAS TOMADAS POR UN DRON.	143
FIGURA 37. ORTOFOTO COMO PRODUCTO DEL PROCESO FOTOGRAMÉTRICO DE IMÁGENES TOMADAS MEDIANTE UN DRON.....	144
FIGURA 38. PLANO FOTOGRAMÉTRICO DE LA CIUDAD UNIVERSITARIA DE CARACAS. ESCALA 1:1000. DATUM LOMA QUINTANA.....	145

FIGURA 39. PORTAL SUNEARTHTOOLS.COM	146
FIGURA 40. MAPA CON GRÁFICO POLAR DEL LUGAR.....	147
FIGURA 41. CARTA ESTEREOGRÁFICA	148
FIGURA 42. CARTA CILÍNDRICA	148
FIGURA 43. APLICACIÓN PARA LA DESCARGA DEL ARCHIVO EN TABLA EXCEL.....	149
FIGURA 44. DOCUMENTO EXCEL DESCARGADO CORRESPONDIENTE A LA POSICIÓN DEL SOL CADA HORA, DESDE LAS 8 AM A 7PM, DE CADA DÍA DEL AÑO. (COORDENADAS, FECHAS, ELEVACIÓN (E) Y AZIMUT (A) Y HORAS DEL DÍA)	149
FIGURA 45. TABLA DE POSICIÓN DEL SOL CON EL FORMATO DE HOJA DE CÁLCULO DE EXCEL (.XLSX)	150
FIGURA 46. TABLA DE DATOS ORGANIZADOS EN EXCEL: RADIACIÓN SOLAR GLOBAL	151
FIGURA 47. DELIMITACIÓN UTILIZANDO EL MDS	152
FIGURA 48. DELIMITACIÓN UTILIZANDO LA ORTOFOTO.....	153
FIGURA 49. CONJUNTO DE HERRAMIENTAS DISPONIBLES PARA SUPERFICIES EN MODELOS RASTER EN ARCGIS 10.1	156
FIGURA 50. MDS DE TECHOS. MÁSCARA DE POLÍGONOS DE TECHOS DE LAS EDIFICACIONES.....	157
FIGURA 51. COMPARACIÓN DE VALORES POR PENDIENTE EN GRADOS VERSUS PORCENTAJE	160
FIGURA 52. DIRECCIONES DE LA ORIENTACIÓN QUE SE USA EN ARCGIS	166
FIGURA 53. TABLA DE POSICIÓN DEL SOL CON FORMATO DE TABLA DE ATRIBUTOS DE ARCGIS (.DBF)	170
FIGURA 54. HERRAMIENTA MODELUILDER. ABRE UNA VENTANA PARA REALIZAR MODELOS DE GEOPROCESAMIENTOS.....	171
FIGURA 55. VENTANA DE MODELUILDER. HERRAMIENTA DE ITERACIÓN DE SELECCIÓN DE FILAS.....	172
FIGURA 56. HERRAMIENTA SÓLO DISPONIBLE EN LA VENTANA DE MODELUILDER. HERRAMIENTA OBTENER UN VALOR DEL CAMPO	172
FIGURA 57. SUBMODELO PARA EL CÁLCULO DE LOS MAPAS DE SOMBRA A TRAVÉS DE UN ITERADOR	173
FIGURA 58. GENERACIÓN DEL MAPA DE SOMBRAS (21 DE MARZO DE 2015 A LAS 10:00 H).....	173

FIGURA 59. HERRAMIENTAS DE SUPERPOSICIÓN: SUMA PONDERADAS PARA MODELOS RASTER EN ARCGIS 10.1	175
FIGURA 60. SUBMODELO QUE CALCULA EL MAPA DE SOMBRAS POR MES. (PESO IGUAL A LA UNIDAD)	176
FIGURA 61. SUBMODELO QUE CALCULA EL MAPA DE SOMBRAS ANUAL. (PESO IGUAL A LA RADIACIÓN GLOBAL SOLAR)	176
FIGURA 62. DISTRIBUCIÓN DE LAS SOMBRAS EN EL LUGAR DE LOS MESES CORRESPONDIENTES.	178
FIGURA 63. DISTRIBUCIÓN DE LAS SOMBRAS EN LOS TECHOS DE LOS MESES CORRESPONDIENTES. SOMBRAS REPRESENTADAS CON COLOR MAGENTA.	178
FIGURA 64. MODELO PARA DELIMITAR ACCESIBILIDAD A LOS TECHOS	181
FIGURA 65. GENERACIÓN DE LA ZONA DE INFLUENCIA ALREDEDOR DE LA POLILÍNEA	182
FIGURA 66. EXTRACCIÓN DE LA PARTE QUE INTERESA (ZONA INTERNA DEL CONTORNO DE LOS TECHOS CON DISTANCIA DE 1M). GENERACIÓN DEL POLÍGONO DE ACCESOS A TECHOS.	182
FIGURA 67. OBTENCIÓN DEL POLÍGONO DE ACCESIBILIDAD A LOS TECHOS. SE VISUALIZA EL ACCESO DE 1M DE DISTANCIA EN CONJUNTO CON LA SUPERFICIE DISPONIBLE PARA LA COLOCACIÓN DE LOS PANELES FOTOVOLTAICOS.	183
FIGURA 68. MODELO PARA DETERMINAR LAS SUPERFICIES DE INFRAESTRUCTURA INADECUADA.	186
FIGURA 69. MODELO PARA CALCULAR SUPERFICIE DE LOS TECHOS	188
FIGURA 70. CAPA DE POLÍGONOS GENERADA DE LA SUPERFICIE DISPONIBLE EN TECHOS A PARTIR DE LA CAPA RASTER OBTENIDA DE LA SUPERPOSICIÓN.	191
FIGURA 71. PASO 1: ELIMINACIÓN DE LA CAPA DE POLÍGONOS QUE NO REPRESENTA LA SUPERFICIE ÚTIL	192
FIGURA 72. PASO 2: ELIMINACIÓN Y RELLENO DE PARTES DE AGUJEROS DE POLÍGONOS PARA CREAR UNA ENTIDAD (POLÍGONO) MÁS CONSISTENTE.	192
FIGURA 73. PASO 3: SUAVIZADO DE POLÍGONOS UTILIZANDO EL MÉTODO PAEK (APROXIMACIÓN POLINOMIAL CON NÚCLEO EXPONENCIAL) PARA MEJORAR LA CALIDAD ESTÉTICA Y CARTOGRÁFICA.	193
FIGURA 74. PASO 4: SE COMBINAN LOS POLÍGONOS ENTRE SÍ DETERMINANDO UNA DISTANCIA ESPECÍFICA PARA FORMAR NUEVOS POLÍGONOS UTILIZANDO LA OPCIÓN NO ORTOGONAL QUE GENERA UNA FORMA MÁS ARMÓNICA.	193
FIGURA 75. TABLA DE ATRIBUTOS EN LA CUAL SE CREA EL CAMPO PARA CALCULAR EL ÁREA A TRAVÉS DEL MENÚ DE OPCIONES	194

<i>FIGURA 76. GENERACIÓN AUTOMÁTICA DEL ÁREA DE LOS POLÍGONOS ESPECIFICANDO CIERTAS CONDICIONES.....</i>	<i>194</i>
<i>FIGURA 77. TABLA DE ATRIBUTOS DE LAS ÁREAS DE LOS POLÍGONOS DE SUPERFICIE DISPONIBLE PARA INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS.....</i>	<i>195</i>
<i>FIGURA 78. MODELO PARA LA GENERACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR.....</i>	<i>198</i>
<i>FIGURA 79. HISTOGRAMAS DE LA POTENCIA INSTALADA EN DIVERSOS MÓDULO FOTOVOLTAICO SEGÚN SU EFICIENCIA</i>	<i>216</i>
<i>FIGURA 80. HISTOGRAMAS DE LA ENERGÍA PRODUCIDA EN DIVERSOS MÓDULO FOTOVOLTAICO SEGÚN SU EFICIENCIA.</i>	<i>217</i>

ÍNDICE DE MAPAS

MAPA 1. DELIMITACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	141
MAPA 2. ACTUALIZACIÓN DE LOS TECHOS DE LA CARTOGRAFÍA BÁSICA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO.....	153
MAPA 3. INCLINACIÓN DE LOS TECHOS. UTILIZANDO LA HERRAMIENTA «SLOPE» DE ARCGIS 10.1.....	158
MAPA 4. DETERMINACIÓN DE LA INCLINACIÓN MENOR A 35° EN LOS TECHOS DE LAS EDIFICACIONES.....	159
MAPA 5. MDS TECHOS. DELIMITACIÓN DEL CONTORNO DE LOS EDIFICIOS	163
MAPA 6. ORIENTACIÓN DE LOS TECHOS. UTILIZANDO LA HERRAMIENTA «ASPECT» DE ARCGIS 10.1	164
MAPA 7. DETERMINACIÓN DE LA ORIENTACIÓN SUR, SURESTE Y SUROESTE EN LOS TECHOS	165
MAPA 8. DISTRIBUCIÓN ANUAL DE LAS SOMBRAS EN LA ZONA DE ESTUDIO	177
MAPA 9. SUPERFICIE DE LAS EDIFICACIONES AFECTADAS POR SOMBRAS	179
MAPA 10. DELIMITACIÓN DE LA ACCESIBILIDAD EN LOS TECHOS PARA EL MANTENIMIENTO DE ARREGLOS FOTOVOLTAICOS.....	184
MAPA 11. DETERMINACIÓN DE LAS SUPERFICIES ADECUADAS PARA LA INSTALACIÓN DE ARREGLOS FOTOVOLTAICOS (EDIFICIOS).....	186
MAPA 12. TECHOS DISPONIBLES PARA LA INSTALACIÓN DE ARREGLOS FOTOVOLTAICOS. (CAPA RASTER)	188
MAPA 13. ÁREAS DE LA SUPERFICIE DISPONIBLE PARA LA INSTALACIÓN DE ARREGLOS FOTOVOLTAICOS	195
MAPA 14. SUPERFICIE DE TECHOS DISPONIBLES POR EDIFICIOS PARA INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS	196
MAPA 15. RADIACIÓN ANUAL	199
MAPA 16. RADIACIÓN GLOBAL ANUAL EN LOS TECHOS DE LAS EDIFICACIONES.....	200
MAPA 17. POTENCIA INSTALADA PARA MÓDULOS DEL TIPO SI-MONOCRISTALINO.....	202
MAPA 18. POTENCIA INSTALADA PARA MÓDULOS DEL TIPO SI-MULTICRISTALINO	203
MAPA 19. POTENCIA INSTALADA PARA MÓDULOS DEL TIPO CIS	203
MAPA 20. POTENCIA INSTALADA PARA MÓDULOS DEL TIPO TeCd.....	204

<i>MAPA 21. POTENCIA INSTALADA PARA MÓDULOS DEL TIPO SILICIO AMORFO</i>	<i>204</i>
<i>MAPA 22. ENERGÍA ANUAL PRODUCIDA POR MÓDULOS DEL TIPO SI-MONOCRISTALINO</i>	<i>206</i>
<i>MAPA 23. ENERGÍA ANUAL PRODUCIDA POR MÓDULOS DEL TIPO SI-MULTICRISTALINO.....</i>	<i>206</i>
<i>MAPA 24. ENERGÍA ANUAL PRODUCIDA POR MÓDULOS DEL TIPO CIS.....</i>	<i>207</i>
<i>MAPA 25. ENERGÍA ANUAL PRODUCIDA POR MÓDULOS DEL TIPO TECd</i>	<i>207</i>
<i>MAPA 26. ENERGÍA ANUAL PRODUCIDA POR MÓDULOS DEL TIPO SILICIO AMORFO</i>	<i>208</i>
<i>MAPA 27. ÁREA EN LAS SUPERFICIES DE LOS TECHOS DISPONIBLES EN LAS EDIFICACIONES PARA LA INSTALACIÓN DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS.....</i>	<i>211</i>
<i>MAPA 28. LA UBICACIÓN DEL ÁREA EN LAS SUPERFICIES DE LOS TECHOS DISPONIBLES EN LAS EDIFICACIONES PARA LA INSTALACIÓN DE SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS.</i>	<i>212</i>

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. DIMENSIONES DE ESCALAS POSIBLES.....	37
TABLA 2. RESUMEN DE LAS ESTRUCTURAS MÁS USUALES UTILIZADAS PARA EL ALMACENAMIENTO DE LOS MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN	76
TABLA 3. MÉTODOS DE CAPTURA DE DATOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MDE	80
TABLA 4. TIPOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SEGÚN SU EFICIENCIA	134
TABLA 5. PROMEDIO MENSUAL RADIACIÓN GLOBAL (KWH/M ²) DURANTE 22 AÑOS.....	140
TABLA 6. TIPOS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS SEGÚN SU EFICIENCIA	201
TABLA 7. ÁREA DE SUPERFICIE DISPONIBLE EN LOS EDIFICIOS INVOLUCRADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO PERTENECIENTE A LA U.C.V.	213
TABLA 8. RESULTADO DE POTENCIA Y ENERGÍA MÁXIMAS OBTENIDAS EN LAS REPRESENTACIONES GRÁFICAS SEGÚN LOS TIPOS DE MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	215
TABLA 9. POSICIÓN (ELEVACIÓN Y AZIMUT) DEL SOL MES DE MARZO.	236
TABLA 10. POSICIÓN (ELEVACIÓN Y AZIMUT) DEL SOL MES DE JUNIO.	243
TABLA 11. POSICIÓN (ELEVACIÓN Y AZIMUT) DEL SOL MES DE SEPTIEMBRE.	250
TABLA 12. POSICIÓN (ELEVACIÓN Y AZIMUT) DEL SOL MES DE DICIEMBRE.....	257

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

- ASPRS: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos).
- BMP: Bit MaP. Es un formato que se utiliza en todos los programas que despliegan y editan imágenes.
- CA: Corriente Alterna.
- CAD: Computer-Aided Design (Dibujo Asistido por Computador).
- CD: Corriente Directa.
- CORPOELEC: Corporación Eléctrica Nacional.
- Dron: Término comúnmente más empleado para referirse a un Vehículo Aéreo no Tripulado.
- ESRI: Environmental Systems Research Institute (Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales), es un proveedor internacional de aplicaciones de sistemas de información geográfica (SIG), SIG web y aplicaciones de gestión de geodatabase.
- FV: Fotovoltaico.
- GIF: Graphic Interchange Format. Extensión de formato de imágenes que son de pequeño tamaño.
- GIS: Geographic Information Systems.
- GMT: Greenwich Mean Time (Meridiano de Greenwich).
- GNSS: Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegación por Satélite).
- GPS: Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global).

- IFOV: Instantaneous Field of View (Campo de Vista Instantáneo).
- INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- ISPRS: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos).
- JPEG: Joint Photographic Experts Group. Formato de imagen que permite alcanzar elevados niveles de compresión, manteniendo una calidad adecuada.
- kWh/m²: Kilo watts horas por metros cuadrados.
- LiDAR: Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging. Es una tecnología que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado.
- MDE: Modelo Digital de Elevación.
- MDS: Modelo Digital de Superficie.
- MDT: Modelo Digital de Terreno.
- NASA: National Aeronautics and Space Administration (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio).
- PAEK: Polynomial Approximation with Exponential Kernel (Aproximación polinomial con núcleo exponencial). Método que suaviza los polígonos en función de una tolerancia de suavizado.
- PNG: Portable Network Graphic. Es un formato basado en las características del GIF.
- SIG: Sistema de Información Geográfica.
- SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas.

- TIFF: Tagged Image File Format. Es un formato creado para adquirir y crear imágenes optimizadas para la impresión.
- TIN: Triangulated irregular network.
- UAV: Unmanned Aircraft Vehicle (Vehículo Aéreo no Tripulado).
- UCV: Universidad Central de Venezuela.
- VANT: Vehículo Aéreo No Tripulado.
- WGS84: World Geodetic System 1984.
- 3D: Tercera Dimensión.

INTRODUCCIÓN

Existe un importante impacto sobre el medio ambiente que ocasiona el ser humano, del cual deberíamos ser conscientes. Un serio problema al que nos enfrentamos es el incremento de la contaminación en las ciudades debido a diversos factores, consecuencia del desarrollo industrial e incluso desarrollo de actividades cotidianas que conlleva a un consumo excesivo e ineficiente de energía.

La humanidad ha conseguido de manera acelerada y sostenible un notable crecimiento tecnológico, lo cual se incrementa cada vez más, al mismo tiempo la población urbana crece, lo que lleva a que cada vez haya más edificios acoplados a los servicios modernos y más personas haciendo uso de ellos, trayendo como consecuencia un aumento en la producción y el consumo de energía eléctrica ocasionando alteraciones en la atmósfera, dando lugar a graves afecciones medioambientales que contribuyen a la alteración del clima y generación del calentamiento global.

La forma de producción convencional, es a base de centrales termoeléctricas, hidroeléctricas y nucleares, que producen energía eléctrica en las centrales de forma concentrada y que debe ser transportada a los grandes centros de consumo. Venezuela tiene la mayor generación eléctrica por habitante de Latinoamérica y también es el país con el consumo eléctrico per cápita más alto de la región, el 65% de la generación eléctrica venezolana proviene de las centrales hidroeléctricas, 35% proviene de plantas termoeléctricas, y casi un 3% corresponde al sistema de generación distribuida, conformada por grupos electrógenos.

Desde hace ya un tiempo, hemos venido enfrentando problemas energéticos, a este fenómeno se le ha denominado “Crisis Energética”, debido a diversas

razones, como el aumento del consumo de energía eléctrica causa del constante crecimiento, tanto del sector residencial, como del sector industrial, agotamiento de recursos naturales como el agua dulce, junto con el agotamiento de reservas mundiales de petróleo.

El cambio climático es la mayor amenaza al medioambiente que enfrenta en la actualidad la humanidad. Las emisiones constantes y desproporcionadas de gases por parte de las industrias, entre otros abusos propiciados hacia los recursos naturales, están provocando graves modificaciones en el clima a nivel global. Las consecuencias se traducen en inundaciones, sequías, cambios bruscos de temperaturas y todo tipo de desastres naturales que dejan a las poblaciones desvalidas. En Venezuela, el mayor porcentaje de la generación eléctrica es propiciada por centrales hidroeléctricas, la cual se ve afectada a gran magnitud por este cambio climático en el suministro de agua y la producción de electricidad.

De manera que la tendencia fundamental es disminuir los problemas energéticos, contribuir con la conservación del planeta y evitar la merma de los embalses, la quema de combustible y el calentamiento global; esto ha generado diferentes propuestas que promueven a revisar la forma en cómo utilizamos la energía, cómo la insertamos en el proceso de producción, que beneficios obtenemos de la producción de bienes y cómo interactuamos con el medio ambiente. Frente a esta crisis ha surgido la necesidad de aprovechar los recursos energéticos disponibles de una mejor forma, como el diseño de dispositivos eléctricos y electrónicos de uso eficiente, se han realizado campañas que permitan crear conciencia en los usuarios, etc. Por otro lado se han ideado formas de aprovechar diversos tipos de energías naturales renovables con el propósito de convertirlas en energía eléctrica, en las cuales destacan la energía eólica, geotérmica y, la que nos interesa, la energía solar. En pro de promover un desarrollo sustentable en equilibrio con el medio ambiente se propone la inclusión de diferentes tecnologías

alternativas capaces de contribuir a la demanda de generación de energía eléctrica, es aquí donde cobra fuerza el estudio de proyectos basados en la utilización de paneles solares (Sistemas de Paneles Fotovoltaicos).

Una de las principales razones por las cuales se debe fomentar este tipo de tecnología alternativa es que posee como principal característica su colaboración con la protección del medio ambiente, ya que no genera gases contaminantes o residuos fósiles. Otra ventaja de dichos sistemas fotovoltaicos es su contribución con las otras formas de generación de energía tradicionales, para satisfacer el aumento de la demanda energética de la población.

Vale destacar una frase de reflexión de suma importancia para el ser humano y los países en pro de un desarrollo en tecnologías renovables para la sustentabilidad del medio ambiente: «No cambiemos el clima, cambiemos el sistema y, en consecuencia, comenzaremos a salvar el planeta. El capitalismo, el modelo de desarrollo destructivo está acabando con la vida, amenaza con acabar definitivamente con la especie humana.» (CORPOELEC, 2015).

CAPÍTULO I. FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Siendo Venezuela uno de los mayores consumidores de energía eléctrica en Latinoamérica, nos hemos venido enfrentando actualmente a problemas energéticos, debido a diversas razones, una de las cuales implica el constante crecimiento del sector residencial y del sector industrial, es conveniente diseñar un modelo geográfico que nos brinde la oportunidad de considerar y evaluar el posible uso de una fuente de energía alternativa que sea limpia y segura con una buena productividad y rentabilidad. Al plantearse el uso de esta fuente de energía en Venezuela, es necesario un estudio previo de la superficie, que nos permita delimitar, visualizar y estipular como se puede distribuir geográficamente la instalación de equipos utilizados en paneles fotovoltaicos; es decir se obtendrá material gráfico incluyendo posición y radiación del sol según el transcurrir del tiempo y aprovechar esta fuente de energía esencial al máximo, que permita situar de manera idónea este sistema de potencial eléctrico.

Sabiendo que la Universidad Central de Venezuela requiere abastecerse de energía, se considera que para apoyar la nueva tecnología y la protección del ambiente más la utilización de los recursos que nos brinda nuestro entorno, es conveniente la inclusión de energías alternativas como lo son los paneles fotovoltaicos, para ello se necesita realizar una representación gráfica donde se tendrá como propósito mostrar la posibilidad de analizar, evaluar y proponer las mejores ubicaciones para la conformación del sistema de energía eléctrica solar en un ámbito urbano y así visualizar aquellos techos disponibles para su mejor aprovechamiento, aportando una importante aplicación del uso de la fotogrametría con dron, a la utilización de energía alternativa en Venezuela.

1.2 JUSTIFICACIÓN

El presente Trabajo Especial de Grado pretende mostrar la posibilidad de desarrollar un modelo de análisis y evaluación, logrando capturar las ubicaciones con potencial para idear, planear y proyectar una factible instalación y conformación de un sistema alternativo de energía eléctrica solar en un ámbito urbano, empleando ciertos métodos que evalúan criterios fundamentales que pudiesen afectar el uso de estos sistemas y así obtener un modelo preciso y válido; siendo este trabajo una aplicación al uso de la fotogrametría digital que recurre a la ayuda de nuevas tecnologías en auge, como lo es el dron (vehículo aéreo no tripulado). El desarrollo de estos sistemas que utilizan fuentes de energías renovables, refiriéndonos específicamente a los paneles fotovoltaicos, aportan un gran beneficio al medio ambiente reduciendo la contaminación, a demás de ser un paso importante para tener nuestro propio recurso energético.

A su vez, se estaría impulsando la innovación de vías energéticas renovables en Venezuela, que potenciarán desarrollos económicos novedosos, elevando la calidad de vida de los sectores rurales e impulsando un desarrollo de equilibrio con el medio ambiente.

1.3 MARCO REFERENCIAL

En la actualidad, con la gran cantidad de avances tecnológicos e informáticos, la Universidad Central de Venezuela ha venido generando una corriente para que los alumnos desarrollen innovadores trabajos e investigaciones en el área de sustentabilidad con el medio ambiente, en este estudio relacionamos el área de la fotogrametría digital junto con el campo sustentable, aplicando los conocimientos en el impulso y desarrollo a la inclusión de nuevas tecnologías alternativas.

Se han venido desarrollando diversos trabajos en esta área, como lo son: «Estudio de la factibilidad en la implementación de un sistema basado en paneles fotovoltaicos para reducir el consumo de energía eléctrica en la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.», presentado por el Br. Sánchez R., Bernie J. (2012); «Implementación de un sistema de iluminación para avisos luminosos mediante el uso de energía solar», presentado por el Br. Ramírez G., Valery J. (2012), estos han sido desarrollados en la Escuela de Ingeniería Eléctrica; los cuales han sido de utilidad como apoyo a la posible implementación de tecnología alternativa en la U.C.V. y así aprovechar esta energía renovable.

También se ha desarrollado en el núcleo de Cagua de la U.C.V. ciertos trabajos que se inclinan por el mismo estudio, como: «Propuestas de cambios de cubiertas de techos con instalaciones de paneles solares y sistemas de captación y almacenamiento de aguas pluviales, en los galpones de aulas del núcleo Armando Mendoza de la Facultad de Ingeniería de la UCV, Cagua», presentado por el Br. Bravo H., David R. (2012), presentado en la Escuela de Ingeniería Civil.

Como estos trabajos, existen una cantidad innumerables que no solo se han llevado a cabo en la Universidad Central de Venezuela, también en otras universidades existe la tendencia de dejar estudios que aporten a Venezuela la consideración de trabajar con esta misma tecnología que a nivel mundial es reconocida y ya incluso adaptadas a normas de construcción de edificaciones. En diversos países se han llevado a cabo estudios donde se ha tratado a más profundidad a cerca del tema de la utilización de la energía solar y su aplicación en el desarrollo de tecnología alternativa en pro del medio ambiente, entre diversos trabajos se encuentra uno en particular, donde se abarca el área de la fotogrametría aunado al campo sustentable; presentado por Ana María Martín Ávila, quien realizó el trabajo, optando por el Máster en Tecnologías de la Información Geográficas, titulado: «Modelo Geográfico para la Estimación del

Potencial Fotovoltaico en Tejados. Caso de Estudio: Miraflores de la Sierra» (Madrid – España, 2014). Este trabajo desarrolla una metodología en la que integra una estimación en los techos disponibles de una zona urbana para instalaciones solares, a demás del estudio de la radiación y la consideración de las características técnicas de los equipos utilizados, también tiene en cuenta la reducción de la superficie útil debido a las sombras, orientación e inclinación, calculado con la herramienta de ArcGis, utilizando un Modelo Digital de Elevación obtenido con tecnología LIDAR, y así determina la idoneidad de las edificaciones para albergar este tipo de instalaciones.

Con ayuda del conocimiento fotogramétrico se obtiene un Modelo Digital de Elevación, el cual ha sido base como dato esencial para numerosos trabajos anteriores, como el presentado por la revista ArcUser «The Magazine for Esri Software Users» (La revista para los usuarios de Software de Esri) donde en un artículo «Locating Sites for Photovoltaic Solar Panels», presentado por Andrea Chaves y A. Terry Bahill (2010), se utiliza la superficie del terreno, la forma de los edificios y los árboles, su metodología consiste en establecer criterios que determinan cuales son las localizaciones adecuadas, para lograr una mejor precisión de resultados se toman en cuenta la pendiente, orientación y el efecto de sombras, se obtiene al final un modelo de localización para los paneles solares fotovoltaicos y un modelo final de determinación de los números de paneles.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Realizar un mapa para la ubicación de sistemas fotovoltaicos en ambientes urbanos a partir de un Modelo Digital de Elevación obtenido mediante un dron. La zona estudio será la Ciudad Universitaria (Caracas – Venezuela).

1.4.2 Objetivos Específicos

- Investigar sobre las diferentes energías alternativas, especialmente la fotovoltaica.
- Estudiar la climatología y la cantidad de horas de Sol al año en el Distrito Capital – Venezuela, determinando su radiación anual.
- Generación del Modelo Digital de Elevación y de la cartografía básica mediante el procesamiento de fotografías tomadas desde un dron.
- Clasificación de las superficies de los techos disponibles en las edificaciones para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos.
- Generación de un mapa de potencialidades del área de estudio.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 LA FOTOGRAMETRÍA

2.1.1 Definición de la fotogrametría

Fotogrametría es la ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de las fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición), del objeto fotografiado. Esta definición es en esencia, la adoptada por la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS¹).

Por otra parte, la sociedad americana de fotogrametría y sensores remotos (ASPRS²), tiene la siguiente definición, ligeramente más completa que la anterior: Fotogrametría es el arte, la ciencia y la tecnología de obtener información confiable de objetos físicos y su entorno, mediante el proceso de exponer, medir e interpretar tanto imágenes fotográficas como otras, obtenidas de diversos patrones de energía electromagnética y otros fenómenos.

¹ ISPRS: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos). Establecida en 1910, es una organización no gubernamental dedicada al desarrollo de la cooperación internacional para el avance de la fotogrametría y teledetección y sus aplicaciones. Recuperado de la página web oficial < <http://www.isprs.org/>>.

² ASPRS: The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos). Fundada en 1934, es una asociación científica cuya misión es avanzar en el conocimiento y mejorar la comprensión de las ciencias de mapeo para promover las aplicaciones responsables de la fotogrametría, teledetección, sistemas de información geográfica (GIS), y tecnologías de apoyo. Lema "La Imagen y Sociedad de la Información Geoespacial". Recuperado de <<https://www.asprs.org/>>.

2.1.2 Clasificación de la fotogrametría

Según los métodos utilizados, la fotogrametría se puede clasificar en:

2.1.2.1 La fotogrametría geométrica

Es la parte de la fotogrametría que trata de los aspectos geométricos de la fotografía, sin considerar los principios de la orientación estereoscópica, para obtener valores aproximados de alturas y formas.

Esta parte hace uso de procedimientos simples, enseñados en los cursos básicos, como son el cálculo de escalas en fotos verticales y oblicuas, determinación de coordenadas fotográficas, triangulación radial, desplazamiento por relieve y cálculo de paralajes.

2.1.2.2 La fotogrametría analógica

Surge en la década de los treinta basada en aparatos de restitución y es la responsable de la realización de la mayoría de la cartografía mundial. En ella, un par de fotografías es colocado en un aparato restituidor de tipo óptico o mecánico. El operador realiza en forma manual la orientación interior y exterior para crear el modelo estereoscópico, debidamente escalado y nivelado. El levantamiento de la información planimétrica y altimétrica del modelo se realiza también en forma manual, mediante el seguimiento con la marca flotante posada sobre los detalles de la superficie del modelo. Esta información es ploteada en una cartulina colocada sobre la mesa trazadora, relacionada con el modelo por medios mecánicos o eléctricos.

2.1.2.3 La fotogrametría analítica

Aparece como un desarrollo natural de la interrelación entre los aparatos restituidores analógicos y el surgimiento de la computación. En ella, la toma de información es analógica y el modelado geométrico es matemático. Mediante el uso de un monocomparador o de un estereocomparador integrado en el restituidor, se miden las coordenadas x , y de los puntos pertinentes de las fotografías, coordenadas que son procesadas por los programas del computador del sistema. Este realiza el procesamiento de la orientación interior y exterior en forma analítica y procesa el levantamiento de la información del modelo que realiza el operador, para llevarla a su correcta posición ortogonal, y finalmente almacenarla en una base de datos tipo CAD.

2.1.2.4 La fotogrametría digital

Surge como consecuencia del gran desarrollo de la computación, que permitió realizar todos los procesos fotogramétricos mediante el uso de computadores. Con la fotogrametría digital crecen las posibilidades de explotación de las imágenes, a la vez que se simplifican las tecnologías, permitiendo con ello la generación automática de modelos de elevación del terreno, ortoimágenes y estereortoimágenes, generación y visualización de modelos tridimensionales etc. Para llevar a cabo la restitución digital, las imágenes digitales son ingresadas en el computador, y mediante visualización en pantalla de las mismas, el operador ingresa los puntos necesarios para realizar el proceso de orientación en forma matemática. La restitución puede ser un proceso iterativo con el operador o ser realizada en forma automática por correlación de imágenes. La salida en la fotogrametría digital puede ser en formato raster o formato vectorial.

2.2 FOTOGRAMETRÍA DIGITAL³

Ackermann⁴ (1991) indica que " *con las cámaras digitales y el procesamiento de imágenes digitales, la Fotogrametría trabajará en un entorno completamente diferente, caracterizado por diferentes equipos, técnicas, oportunidades y por una forma distinta de pensar*".

2.2.1 Aspectos y consideraciones del desarrollo de la fotogrametría digital

El desarrollo de la Fotogrametría Digital debe tener en cuenta diversos aspectos y consideraciones de diferentes naturaleza (Ackermann⁵, 1996):

- a) La Fotogrametría Digital debe proporcionar al menos el nivel de rendimiento de la Fotogrametría Analógica y Analítica. Las estaciones de trabajo digitales deben tener al menos las prestaciones de los restituidores analíticos de imágenes digitales. Alcanzar estos mínimos no supone ninguna ventaja por parte de la Fotogrametría Digital con respecto a los anteriores métodos, debido a la inercia de los sistemas productivos, salvo que sean considerablemente más rápidos y más baratos.

³ Jauregui, L. (2005). *Nociones de Fotogrametría Digital*. Recuperado Julio de 2015, de publicaciones: [t<http://webdelprofesor.ula.ve/iluis/>](http://webdelprofesor.ula.ve/iluis/)

⁴ Ackermann, F. (1991) *Structural Changes in Photogrammetry*. Proc. of the 43rd Photogrammetric Week at Stuttgart University, 9 – 14 September, pp. 9 – 23.

⁵ Ackermann, F. (1996) *Digital Photogrammetry: Challenge and Potential*. PE&RS, 62(6), Junio 1996, p. 679.

- b) La base esencial de las nuevas tecnologías radica en la posibilidad de alcanzar mayor rendimiento y productos que las técnicas existentes. En la Fotogrametría Digital se centraría en la automatización de los procesos fotogramétricos. Los primeros ejemplos de tareas susceptibles de ser automatizados son la aerotriangulación digital, la generación de modelos digitales de terreno mediante la aplicación de técnicas de correlación de imágenes, la generación de ortofotos, sin olvidar diversas medidas y funciones de orientación. Esta automatización será la que supondrá el auge o no de la Fotogrametría Digital con respecto a la Fotogrametría Analítica. La calidad y economía de los productos obtenidos será decisiva para marcar la aceptación de las nuevas técnicas por los usuarios.
- c) La cartografía digital y la extracción de objetos a partir de las imágenes digitales necesitará la intervención humana durante algún tiempo. Por lo que en una primera aproximación no parece que presente ninguna ventaja particular con respecto a las técnicas analíticas, sin embargo, es necesario tener en cuenta que aunque los procesos no sean completamente automáticos si lo son muchas de las tareas que junto con las herramientas de procesamiento de la imagen y edición que son una gran ayuda contribuyen a acelerar el proceso.
- d) Los sistemas digitales permite el tratamiento de imágenes de muy diversa procedencia en un sólo equipo, desde imágenes de rango cercano (cámaras digitales) hasta imágenes aisladas en plataformas espaciales (imágenes satélite).
- e) Los sistemas digitales pueden integrar, fusionar y comparar conjunto de datos de diferentes procedencias, dando lugar a un abanico muy amplio de operaciones dentro y fuera del contexto cartográfico. Así el sistema

fotogramétrico se puede considerar como un elemento básico en los sistemas de información geográficos tridimensionales.

2.2.2 La imagen digital

La imagen digital es un arreglo de números enteros (denominados comúnmente como píxeles) cuya posición dentro del arreglo está asociada a una posición geométrica del escenario representado, ordenados en forma matricial. El origen de coordenadas (filas y columnas) se encuentra en la parte superior izquierda.

Al proceso de obtención de imágenes digitales se le denomina digitalización y consiste en la descomposición de la imagen real en una matriz discreta de puntos de un determinado tamaño, donde cada uno tiene un valor proporcional a su nivel de color.

2.2.3 Formatos más comunes de imagen digital

- BMP (Bit MaP)

Es un formato creado para windows, aunque puede usarse en todos los programas que despliegan y editan imágenes.

- JPEG (Joint Photographic Experts Group)

Es un formato que permite alcanzar elevados niveles de compresión, manteniendo una calidad adecuada.

- GIF (Graphic Interchange Format)

Las imágenes GIF son de pequeño tamaño, y tienen la posibilidad de transparencia y animación. Los programas que manipulan este formato deben pagar royalties a Unisys, propietaria del algoritmo de compresión LZW.

- PNG (Portable Network Graphic)

Es un formato basado en las características del GIF, aunque mejorado y posee el inconveniente de que no es soportado por todos los programas que manipulan imágenes.

- TIFF (Tagged Image File Format)

Es un formato creado por Aldus (Actualmente propiedad de Adobe) y Microsoft; el formato TIFF fue creado para adquirir y crear imágenes optimizadas para la impresión.

2.2.4 El Pixel

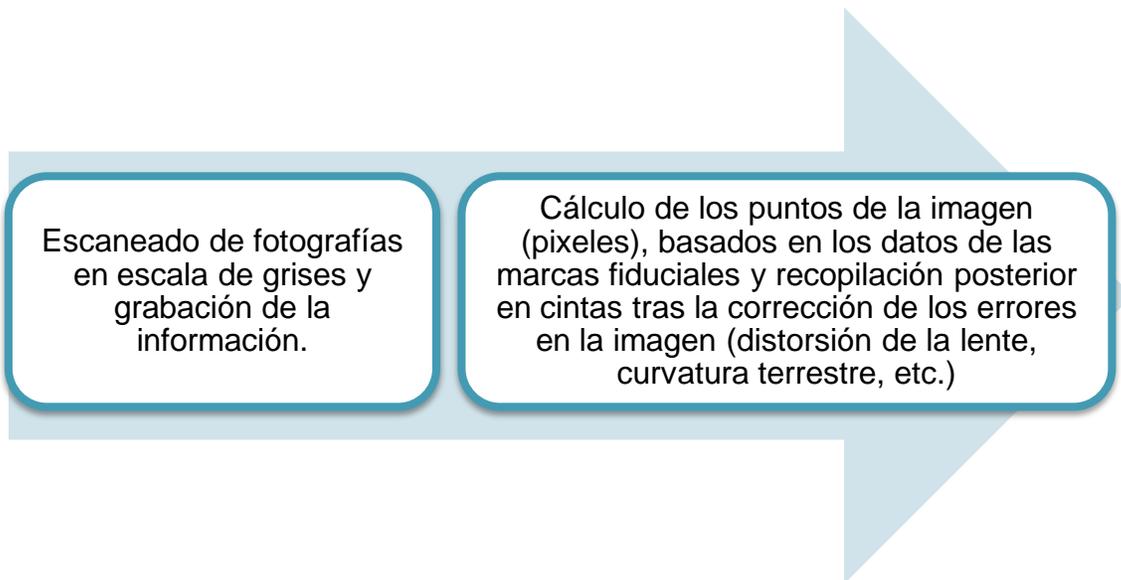
Es la unidad de los elementos pictóricos que constituyen una imagen digital. Es comparable a la resolución puntual de una película fotográfica. La dimensión física del elemento captor (en la actualidad de 9 a 15 μ m) y la longitud focal del sistema óptico empleado, determinan un ángulo sólido, que se prolonga hasta la superficie del terreno. La altitud a la cual se utiliza el dispositivo de captación de la imagen, determina entonces el tamaño del área del terreno que el pixel representa. El ángulo sólido determinado por el transistor y el sistema óptico es mejor conocido con el nombre de IFOV, por sus siglas en inglés (Instantaneous Field Of View, campo de vista instantáneo). En una pantalla de computadora o en un dispositivo

de entrada, como un escáner o una cámara digital, un pixel es la mínima e individualizada información visual que puede capturar o mostrar un elemento.

2.2.5 Fases para el desarrollo de la fotogrametría digital

Esquema básico de las técnicas a seguir en la fotogrametría digital:

I. Fase de preparación



II. Fase 2: Cálculos de los parámetros de orientación

Transformación bidimensional de los puntos de la imagen necesarios para la orientación relativa y absoluta.

Cálculo de los parámetros de orientación relativa ($\varphi_1, \varphi_2, x_1, x_2, \omega_2$) y parámetros de la orientación absoluta ($\phi, \Omega, K, \lambda, X_0, Y_0, Z_0$).

III. Fase 3: Obtención de las alturas de los modelos digitales

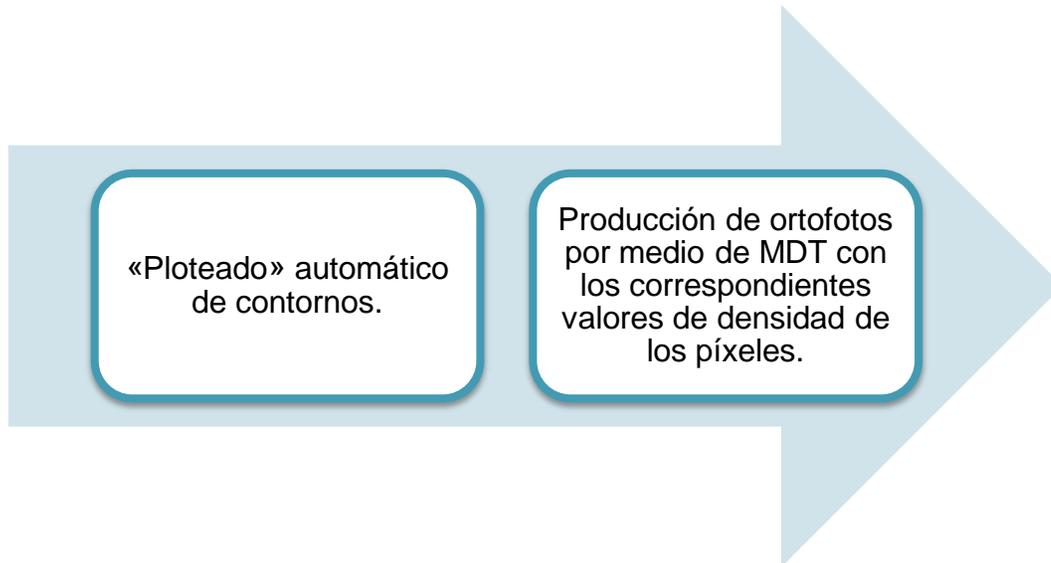
Ordenación de los píxeles respecto a las líneas epipolares.

Correlación Unidimensional de los puntos homólogos a lo largo de las líneas epipolares.

Cálculo de las coordenadas modelos de todos los píxeles a través de los parámetros de orientación absoluta y posterior transformación a coordenadas terreno.

Construcción del MDT con los valores de la densidad de los píxeles de la rejilla patrón respecto al sistema de coordenadas terreno.

IV. Fase 4: Ploteado de contornos y producción de ortofotografías



2.2.6 Ventajas y desventajas de la fotogrametría digital

Ventajas:

- Imágenes de gran estabilidad dimensional.
- Facilidad de visualización.
- Tratamiento por software de las imágenes digitales.
- Automatización de los procedimientos.
- Generación de productos en formato digital.
- Facilidad de distribución de las imágenes y de los productos.

Desventajas:

- Requiere de elevado volumen de almacenamiento.
- Técnica reciente y aún en desarrollo.

2.3 TÉCNICAS Y MÉTODOS PARA EL PROCESO DE LA FOTOGRAMETRÍA⁶

La ejecución de un proyecto fotogramétrico, requiere antes de comenzar los trabajos un planeamiento cuidadoso. Este planeamiento consiste en proporcionar la cobertura fotográfica de la zona a levantar, cumpliendo con unas especificaciones suministradas por el cliente y reflejadas en el pliego de condiciones. De su buena ejecución dependerá la comodidad, rapidez y precisión del resto de los trabajos.

Al realizar la planificación, hay que tener en cuenta todos los factores que inciden en el vuelo para evitar atrasos, errores y cambios de planes en los momentos críticos del vuelo.

Contaremos al principio con dos fases:

- **Planificación del vuelo** que debe seguirse para tomar todas las fotografías aéreas que se usarán en el proyecto.
- **Planificación del control terrestre**, así como la ejecución de todos los trabajos topográficos que satisfagan la precisión requerida por el proyecto.

A partir de un proyecto fotogramétrico dado podemos obtener diversos productos, incluyendo los contactos de las fotografías aéreas, fotomapas, mosaicos, mapas topográficos (planimetría y altimetría), modelos digitales del terreno, mapas catastrales, entre otros.

⁶ Pérez Álvarez, J. A. (2001). *Apuntes de Fotogrametría III*. Universidad de Extremadura. Centro Universitario de Mérida. Mérida – España. Recuperado Enero 2016, de publicaciones: <<http://redgeomática.rediris.es/cartoprofesores/Fotogrametría/ApuntesFotogrametría3.pdf>>

2.3.1 Planificación del vuelo

Es la fase principal, ya que el éxito final de cualquier proyecto fotogramétrico depende más de las fotografías de buena calidad que de otros aspectos.

Se define como plan de vuelo al conjunto de cálculos previos a la realización de un vuelo fotogramétrico, mediante los cuales se organiza las operaciones para conseguir el fin propuesto con las condiciones que se han establecido. (Juan A. Pérez A., 2001).

La misión del vuelo fotogramétrico tiene por objeto:

- Sobrevolar la zona a una altitud que debe calcularse en función de la escala deseada y de la distancia principal de la cámara.
- Cubrir con sus imágenes una determinada zona y para ello es preciso que cada fotografía tenga una zona común con las contiguas "zona de recubrimiento".

Para que puedan cumplirse estos objetivos, el avión deberá volar a una altitud constante, siguiendo una ruta predeterminada y a una velocidad constante, para poder realizar sus disparos con intervalos regulares, que se corresponden a recorridos iguales.

Otro cálculo previo es el de la hora de vuelo, relacionado con la altura del sol sobre el horizonte, que es función de la latitud, de la fecha y la hora. Su resolución precisa de unas tablas astronómicas: pero como en general se prefieren las fotos con poca sombra, se intenta volar hacia el mediodía.

En la planificación de un vuelo existen una serie de decisiones previas tales como la escala del mapa, proyección del mapa, elipsoide de referencia, entre otros, que

han de tenerse en cuenta a la hora de organizar el planeamiento, ya que afectan a las condiciones del vuelo. Existen otras condiciones que se refieren a la calidad de la fotografía tanto en su aspecto geométrico, como en el fotográfico.

Aspectos geométricos de la fotografía aérea:

- Certificado de calibración de la cámara: proporciona los parámetros de orientación interna (distancia principal, punto principal, coordenadas de las marcas fiduciales, distorsiones).
- Escala de la fotografía.
- Recubrimientos longitudinales y laterales.
- Seguridad de un recubrimiento total en toda la zona.
- Arrastre de la imagen sobre la fotografía.
- Horas útiles de tomas fotográficas.

Por otra parte, algunos aspectos fotográficos que se pueden citar, son:

- La calidad de la imagen.
- La homogeneidad de tonalidad.
- La ausencia de nubes.
- Longitud e intensidad de las sombras.

Se puede concretar que el planeamiento de vuelo debe ser planificado cuidadosamente y ejecutado fielmente de acuerdo con un plan de vuelo, que consta de dos aspectos fundamentales:

Un mapa de vuelo que muestra donde deben ser tomadas las fotografías.

Especificaciones que trazan como deben tomarse, incluyendo requisitos concretos tales como cámara, escala, altura de vuelo, recubrimientos, inclinaciones permitidas, entre otras.

2.3.1.1 Mapa de vuelo

El mapa de vuelo proporciona los límites del Proyecto, los ejes de vuelo muestran al piloto por donde debe volar para obtener el recubrimiento deseado. El mapa de vuelo se prepara sobre algún mapa ya existente de la zona, marcando sobre esta cartografía, la zona objeto del Proyecto. Calculada la dimensión del territorio correspondiente a cada foto a la escala del mapa, se indican sobre éste los correspondientes ejes de vuelos de cada pasada, cuidando de mantener el recubrimiento lateral previsto. Sobre los ejes de vuelo y a intervalos regulares a que correspondan el recubrimiento propuesto, se marcan los puntos sobre cuya vertical, deberá realizarse la exposición de la película.

Considerando un vuelo ideal, el punto central de cada fotografía coincidirá con los puntos propuestos, estando todos éstos sobre la misma recta en cada pasada, siendo las pasadas rigurosamente paralelas.

Si la zona a trabajar es regular, los ejes de vuelos suelen estar orientados Norte-Sur o Este-Oeste, numerando las pasadas según este criterio, así como las fotografías de cada pasada.

2.3.1.2 Los parámetros del vuelo

En un caso ideal (mostrado en la figura 1), donde el avión a una altura H , recorrerá el terreno a levantar disparando el obturador de la cámara a intervalos regulares de tiempo, de manera que cada dos fotografías dispongan del recubrimiento adecuado y se distribuyan sus pasadas sobre el terreno en trayectorias paralelas, barriendo la zona por pasadas que dispongan a su vez de suficiente recubrimiento lateral, para poder solapar unas con otras.

Donde:

s = Lado del negativo

P = Pto principal en O_1

F_a = Superficie del terreno a cubrir

P' = Pto principal en O_2

c = constante de la cámara

b = Fotobase

V_g = Velocidad del avión

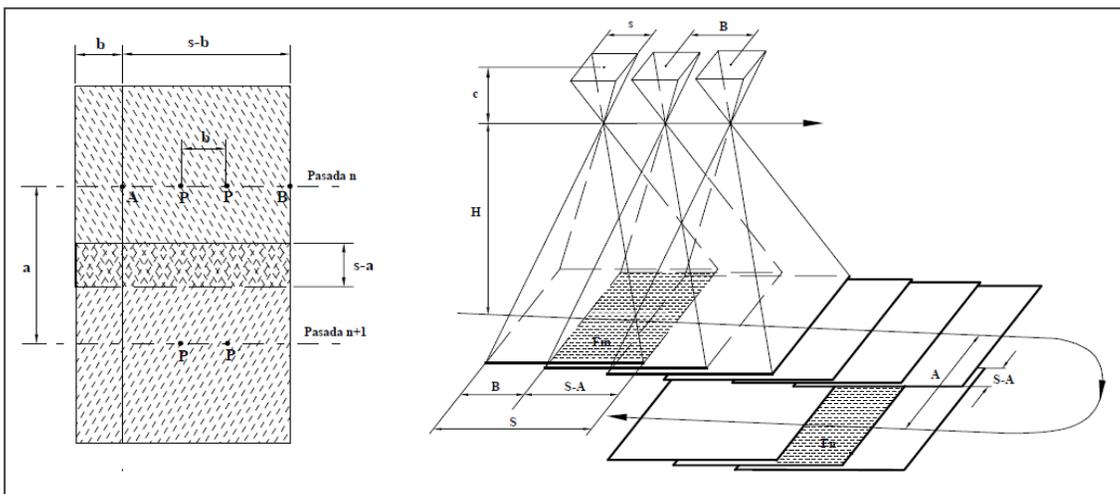


Figura 1. Disposición ideal para los fotogramas

Fuente: Apuntes Fotogrametría III. Juan A. Pérez A. (2001)

- Recubrimiento Longitudinal:

$$p = \overline{P'A} + \overline{P'B} = \overline{P'A} + \overline{PB} - \overline{PP'} = \frac{s}{2} + \frac{s}{2} - b = s - b$$

$$p\% = \frac{(s - b)100}{s}$$

- Recubrimiento Transversal:

$$q\% = \frac{(s - a)100}{s}$$

Siendo “a” la distancia entre los puntos principales de dos pasadas consecutivas.

- Escala de la Imagen:

$$Mb = \frac{1}{mb} = \frac{c}{H} = \frac{s}{S}$$

- Superficie cubierta por una foto:

$$Fg = S^2 = (s mb)^2$$

- Longitud de la base en recubrimiento longitudinal del p%:

Fotobase:

$$b = s \left(1 - \frac{p\%}{100}\right)$$

Base:

$$B = b mb = S \left(1 - \frac{p\%}{100}\right)$$

- Intervalo entre pasadas:

$$a = s \left(1 - \frac{q\%}{100} \right) \qquad A = S \left(1 - \frac{q\%}{100} \right)$$

- Número de fotos por pasadas:

$$n_p = \frac{L_p}{B} + 1$$

- Número de pasadas:

$$n_q = \frac{L_q - S}{A} + 1$$

- Superficie estereoscópica por par:

$$F_m = (S - B)S$$

- Superficie adicional estereoscópica por foto:

$$F_n = AB = S^2 \left(1 - \frac{p\%}{100} \right) \left(1 - \frac{q\%}{100} \right)$$

- Número de fotos necesarias:

$$n_t = n_p \times n_q$$

- Intervalo entre exposiciones (tiempo de obturación de la cámara):

$$\Delta t = \frac{B}{V_g} = \frac{s \cdot m_b}{V_g} \left(1 - \frac{p\%}{100} \right)$$

2.3.1.3 Especificaciones técnicas

Para los Vuelos Fotogramétricos se presenta un Pliego de Condiciones Técnicas, el cual es esencial permitiendo llevar un control para obtener un resultado final satisfactorio con el mínimo de errores posibles por parte del vuelo. A continuación se expone de manera resumida su contenido.

a) Condiciones para optar a la contratación.

- ✓ Documentación prevista en la Ley de Contratos del Estado y demás disposiciones de aplicación.

b) Condiciones generales del trabajo.

- ✓ Zonas y superficies.
- ✓ Escala de la imagen.
- ✓ Tipo de objetivo.
- ✓ Tipo de fotografía.
- ✓ Precio tipo e importe.
- ✓ Plazo de ejecución.

c) Cámara y equipo asociado.

- ✓ Cámara. Formato del fotograma y distorsiones radiales residuos máximas.
- ✓ Calibración. Certificado valido por un período de tiempo.
- ✓ Filtros.
- ✓ Ventanas para la cámara.
- ✓ Montaje de la cámara.

d) Cobertura fotográfica y vuelo.

- ✓ Cobertura fotográfica.
- ✓ Altura del vuelo. Variación entre el +2% y el -5%.
- ✓ Dirección de las bandas.
- ✓ Recubrimientos. Longitudinal entre el 55% y el 65%, Transversal entre el 20% y 25%.
- ✓ Interrupción de pasadas.
- ✓ Rectitud de pasadas.
- ✓ Verticalidad de los fotogramas.
- ✓ Condiciones fotográficas.

e) Material fotográfico.

- ✓ Película.
- ✓ Exposición y procesado.

2.3.2 Vuelo

2.3.2.1 Condiciones para la toma de fotografías aéreas.

La toma de fotografías aéreas se realizará cuando la altitud del sol sea óptima, es decir, en aquel espacio de tiempo en el cual, los rayos solares presenten una inclinación tal que las sombras arrojadas por los accidentes sea mínima, por ello las limitaciones serán mayores en terreno accidentado.

No existe un criterio fijo para considerar la altitud solar mínima aceptable en el transcurso del año, pero suele adoptarse una altura mínima de 30° del sol sobre el horizonte y en regiones poco accidentadas puede llegarse a los 20°. Cada región tendrá un periodo del año en el cual se cumplen estas condiciones.

Los vuelos se realizarán con cielo despejado y cuando el terreno a fotografiar no tenga nieve, nieblas o brumas, que dificulten la claridad de las fotografías.

2.3.2.2 Métodos de navegación fotográfica

Un método de navegación tiene por objeto guiar al avión entre un punto de partida y uno de llegada, conociendo su posición en todo momento. Generalmente las trayectorias vienen impuestas por el trabajo, de forma que el avión fotográfico no puede apenas separarse de su trayectoria, para asegurar el recubrimiento lateral. Existen varios métodos de navegación, entre ellos tenemos:

2.3.2.2.1 Navegación a simple vista con cartografía disponible

Se representan, sobre los mapas – índices, los ejes de vuelo o pasadas y los puntos principales de los fotogramas, con el menor error posible. El navegante tratará de seguirlos ayudado por las indicaciones de un telescopio de navegación, que permite usar referencias hacia adelante y hacia atrás.

Las pasadas irán numeradas, así como todos los fotogramas de inicio y fin de la pasada, que llevarán rotulado su número de exposición.

2.3.2.2.2 Navegación a simple vista sin cartografía previa

Debido a que en diversos países la cartografía de la zona está sin actualizar, es inexacta o en algunos casos no existe; el navegante recurre a algún método «sin mapa» para obtener una completa cobertura fotográfica.

Existen diferentes métodos de navegación sin cartografía, entre los cuales se encuentran los siguientes:

a) Sobre vuelo a mayor nivel

Este método es usado cuando la zona de trabajo es relativamente pequeña; como ciudades, áreas de ríos, pequeños proyectos de desarrollo, entre otros.

El método consiste en fotografiar inicialmente la zona de trabajo desde una gran altitud y a menor escala. Sobre las fotografías obtenidas anteriormente, se marcan las pasadas fotográficas a la escala correcta elegida para el vuelo final, ejecutando el vuelo basándose en la información obtenida.

En la utilización de este método, la primera operación que hay que decidir es la escala necesaria para sobrevolar el área. Hay que tener en cuenta el tamaño del área requerida y la escala a la cual el navegante tiene que volar la misión final.

b) Vuelo de franjas entrelazadas

Este método se usa para zonas de trabajo más extensas. Se comienza por realizar un vuelo a una escala menor y con mayor altitud, se planifica de manera que la zona de trabajo a sobrevolar fuese mayor que la solicitada, como se observa en la figura.

Obtenidas las copias, se unen entre sí para formar franjas, estableciendo la línea central y las transversales de manera que el detalle común de ambas quede alineado. Sobre la franja central se dibuja un eje de vuelo y se agregan el resto de los ejes de vuelo a ambos lados, hasta completar la zona de trabajo a obtener. Establecidos todos los ejes de vuelo de las pasadas, se pueden numerar las

pasadas para su organización, procediendo a realizar el vuelo a la escala final apoyándonos en la información aportada por las fotografías anteriores.

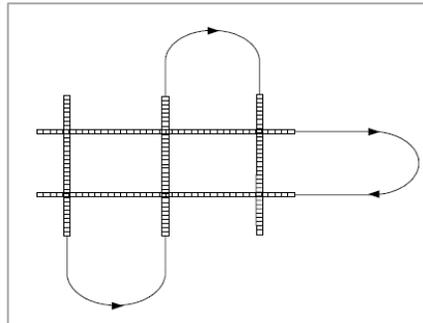


Figura 2. Vuelo de franjas entrelazadas

Fuente: Apuntes Fotogrametría III. Juan A. Pérez A. (2001)

c) Navegación de línea lateral

Es el método más simple desde el punto de vista de la planificación, pero exige un gran respaldo en cuanto a producción fotográfica.

Se basa en una o más pasadas principales que van a ser usadas para lo que se llama seguimiento de la línea lateral. El bloque se planifica más grande de lo necesario.

Previamente se realiza un vuelo de reconocimiento para pruebas de exposición y planificación de la pasada principal. Efectuadas estas pruebas, se procede a la toma de las fotografías de la pasada principal con las especificaciones correctas para el vuelo; al final de la pasada el avión vuelve a la base y se procesa la película. Se hace un conjunto de copias y se forma la pasada trazando una línea

central (eje de vuelo). A partir de ésta se trazan dos ejes paralelos con el recubrimiento lateral especificado.

Una vez que están marcadas las dos nuevas pasadas se vuelve a realizar otro vuelo para la obtención de los fotogramas de las nuevas pasadas. El navegante usará como referencia para la toma de estas nuevas fajas, la línea del recubrimiento lateral, de esta forma tendrá una información terrestre visible en el área de recubrimiento q%.

Efectuadas estas nuevas tomas, el avión vuelve a la base, se obtienen las copias y sobre estas nuevas tomas se repite el proceso.

2.3.2.2.3 Sistema de navegación avanzada

Los sistemas electrónicos de navegación están basados en el conocimiento de las coordenadas del avión respecto al terreno en cada momento del desarrollo del vuelo, con el fin de conducir automáticamente al vehículo a los puntos de exposición aérea, previamente establecidos en el planeamiento de vuelo. Algunos de los más utilizados son:

a) VLF/Omega

El usuario introduce la posición exacta del avión en coordenadas geográficas antes del despegue y los sistemas calculan los movimientos X e Y relativos a partir del despegue, presentando al usuario la posición y velocidad con respecto a la tierra y los errores de trayectoria, incluyendo la deriva. Este sistema se basa en el principio de «volar desde».

b) Sistema Doppler

Basado en el radar Doppler y con el principio llamado «volar desde», este sistema controlado por el navegante mide la distancia y rumbo desde una posición de partida conocida.

c) INS (Sistema de Navegación Inercial)

Se basa en el mismo principio de «volar desde», este sistema hace uso de los cambios relativos de dirección medidos dentro del avión, para estimar las coordenadas X e Y desde un punto de partida conocido.

d) GPS (Global Position System)

El Sistema de Posicionamiento Global es uno de los sistemas más utilizados en la actualidad para la realización de vuelos fotogramétrico, ya que permite obtener en modo cinemático posiciones en coordenadas X, Y, Z del orden del 0.5 m, permitiendo ser utilizado tanto en labores de navegación como en labores de obtención de ciertos elementos de la orientación externa, coordenadas de los centros de proyección (X_0 , Y_0 , Z_0), permite la generación automática de los gráficos de vuelo.

2.3.3 Control Terrestre (Puntos de Apoyo)

Se necesita una vinculación entre la fotografía aérea y la posición terrestre en un sistema de coordenadas. Esta vinculación es el control terrestre. Establecer un control terrestre es identificar algún detalle, bien definido y estable en tiempo y posición, tanto en la fotografía como en el terreno y luego determinar sus coordenadas y cota terrestres.

El número mínimo de puntos para poder efectuar esta operación es de tres; dos puntos en X, Y, Z (Planimétrico – Altimétrico) para poder llevar a cabo el ajuste de la escala del modelo y un tercero en Z (Altimétrico) de manera que sumados a los dos anteriores, hacen un total de tres puntos de coordenadas altimétricas conocidas, para poder efectuar la nivelación del modelo.

La determinación de las coordenadas planimétricas (control horizontal) y altimétrica (control vertical) de estos puntos se conoce con el nombre de apoyo de campo. La realización de los trabajos topográficos y geodésicos que lleva consigo la fotogrametría, es necesario utilizar unos métodos y unos instrumentos que agilicen al máximo el levantamiento de los puntos de control.

La determinación de los puntos de apoyo se puede realizar:

- a) La utilización de procedimientos clásicos de la topografía, pudiéndose dividir los trabajos a realizar en dos fases:
 - ✓ Obtención de una red básica por medio de triangulaciones, trilateraciones, intersecciones o poligonales de precisión. Esta red básica irá enlazada a la red geodésica para permitir conocer las coordenadas absolutas.
 - ✓ Red de Apoyo fotogramétrico, constituida por puntos determinados por mediciones que se apoyan en la red anterior.
- b) La utilización de GPS. Estos aparatos agilizan mucho la toma de datos en campo, ya que no están condicionados a las observaciones clásicas de los instrumentos topográficos.

A la hora de efectuar estos trabajos, es de vital importancia la existencia de redes geodésicas, así como su densidad y el estado de materialización en el terreno. En

aquellas zonas donde estas redes son escasas o no existen, incrementan los trabajos de control terrestre, así como en zonas con una gran vegetación y terreno accidentado.

2.3.3.1 Número y distribución de los Puntos de Apoyo Fotogramétricos

Teóricamente se menciona un número de puntos de apoyo mínimo de tres, aunque se pueden añadir otros para tener un mejor control del modelo. En la siguiente imagen (figura 3) se muestra que se puede adoptar un conjunto de ciertos punto; cuatro puntos con coordenadas X, Y, Z (planimétricos – altimétricos) y un quinto punto de coordenada Z (altimétrica), permitiendo de este modo verificar los basculamientos del modelo y las deformaciones de la imagen, por medio del punto central.

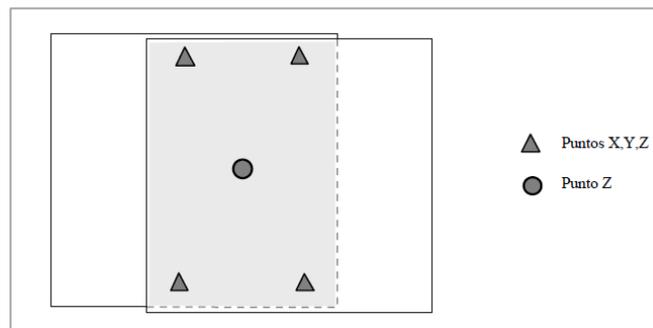


Figura 3. Distribución de los puntos de control terrestre

Fuente: Apuntes Fotogrametría III. Juan A. Pérez A. (2001)

La distribución de los puntos de apoyo en las esquinas del modelo, viene condicionada por el hecho de que estos deben servir de apoyo para la pasada

superior e inferior, e igualmente para los fotogramas antecedente y precedente, con el fin de obtener el mínimo de puntos precisos de control terrestre.

La cantidad y calidad de los puntos de control para un proyecto dependen de un gran número de parámetros, razón por la cual solo se pueden mencionar algunos términos generales sobre esta materia.

Algunos de los mencionados parámetros son:

- Forma de los límites de la zona.
- Tamaño de la zona.
- Características de la zona (plana, accidentada; urbana, rural; con o sin vegetación alta).
- Escala del levantamiento.
- Escala de las fotografías.
- Relación entre las escalas antes mencionadas.
- Intervalo de curvas de nivel.
- Tipo de levantamiento (de línea, ortofoto).
- Método de aerotriangulación que se utilizará.
- Superposición longitudinal y transversal de las vistas.
- Distancia focal de la cámara.

2.3.3.2 Elección de los Puntos de Apoyo Fotogramétricos

Se realiza de forma aproximada, con apoyo de la cartografía existente, las fotografías aéreas, levantamientos previos e información recopilada para el proyecto, se van examinando los entornos donde puedan elegirse en campo.

La elección de los Puntos de Apoyo debe responder a los siguientes criterios:

- El detalle planimétrico deberá ser perfectamente identificable en más de una fotografía.
- Los puntos se elegirán dentro de la zona marcada con la finalidad de que cumplan los requisitos para la realización de la Orientación Absoluta del modelo.
- Si es posible, los puntos quedarán definidos por alineaciones rectas, tales como esquinas de casas, cruces de caminos, entre otros.
- Preferentemente serán un detalle artificial y estable.
- Los puntos altimétricos será conveniente escogerlos sobre partes del terreno de muy débil pendiente (lo más horizontal posible).
- Los puntos de apoyo se pinchan en todos los fotogramas y se marcan en la fotografía por medio de un círculo, teniendo como centro el pinchazo de identificación y un número de serie.

2.3.3.3 Preseñalización de los Puntos de Apoyo

Consiste en la materialización en campo de una serie de señales, previamente a la realización del vuelo, distribuidas según una densidad y forma, para poderlas utilizar como puntos de apoyo fotogramétricos.

La forma de estas señales adoptada más generalmente es la cuadrada, en las que el material utilizado es de aluminio, contrachapado o cartón, en algunos organismos la forma puede llegar a ser circular, constituida por círculos blancos trazados con cal sobre el suelo, también pueden ser mejorados sustituyéndolos por cruces, como se muestra en la figura 4. Las dimensiones de estas señales variarán con la escala de la fotografía:

Tabla 1. Dimensiones de escalas posibles

TIPOS DE ESCALAS	DIMENSIONES
Escalas pequeñas ($\approx 1:18000$)	Aprox. 75 x 75 cm
Escalas medias ($\approx 1:7500$)	Aprox. 30 x 30 cm
Escalas grandes ($\approx 1:3000$)	Aprox. 15 x 15 cm

Fuente: Apuntes Fotogrametría III. Juan A. Pérez A. (2001)

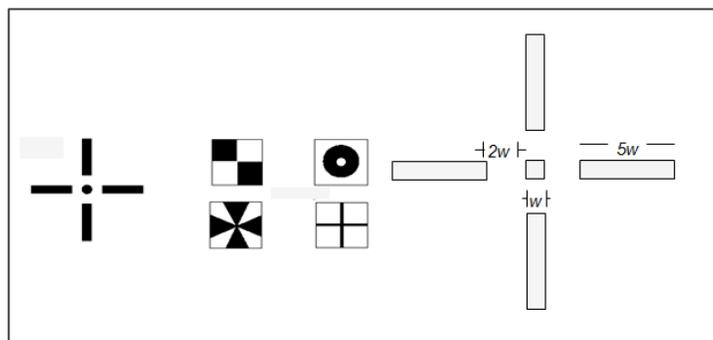


Figura 4. Diversas formas de preseñalización

Fuente: Fotogrametría II. Prof. Julián García.

En conclusión se deberían tomar ciertas consideraciones importantes para la preseñalización, se destacan algunas de estas a continuación:

- Se debe calcular forma y tamaño de las señales de acuerdo con la escala de vistas.
- En cada caso hay que considerar el color de la señal para que contraste bien con los alrededores.
- Hay que seleccionar el material con que se confecciona la señal:
 - ✓ En áreas rurales se puede señalar con telas o tablas pintadas, o láminas de zinc, en forma de cruz, con la utilización de cal; a escalas grandes a veces se pueden usar cartones fijados con estacas.
 - ✓ En áreas urbanas se pueden utilizar pinturas sobre el pavimento.
- Es importante que la señal sea duradera (la cal se lava con la lluvia; las tablas de madera o de zinc las necesita el campesino y se las lleva; la tela muchas veces es destruida por animales o por el viento). Por la durabilidad siempre hay fallas, y si el vuelo se demora mucho por condiciones atmosféricas adversas es necesario recorrer las señales y restablecer las desaparecidas.

En pocas palabras la señal es muy recomendable por su fácil y segura identificación en la fotografía, pero conlleva una serie de dificultades.

2.3.3.4 Control terrestre con Puntos Naturales

Consisten en aquellos elementos que se encuentren en la naturaleza, detalles artificiales que ofrezca la zona estudio que aseguren plasmar en el terreno el diseño realizado consiguiendo que sean útiles para dicho fin.

Trabajando con puntos naturales la situación es diferente, ya que no hay problemas de ubicación, porque se busca un detalle fijo, identificable, en aquel lugar donde se necesita. Pequeñas desviaciones del plan de vuelo no tienen importancia siempre que el área esté cubierta por fotos. Tampoco hay que establecer un control durante la toma para que los puntos no desaparezcan.

Por la experiencia se puede decir que en la mayoría de los trabajos se utilizan puntos naturales para el control.

Ciertos inconvenientes que se pueden presenciar, son:

- Error en la identificación del objeto.
- No siempre se consigue un detalle bien identificable en la zona donde se requiere control.
- Se introducen pequeños errores planimétricos por la iluminación lateral del objeto identificado.

Es importante que el punto sea inamovible; no son buenas opciones carros estacionados, cauchos viejos se ven muy bien como puntos de control a ciertas escalas, pero es muy fácil de moverlos de sitio, entre otros.



Figura 5. Punto Natural para el control terrestre

Fuente: Fotogrametría II. Prof. Julián García

2.3.3.5 Documentos a generar

Los documentos que se generan serán entregados para ser utilizados en las siguientes fases del proceso fotogramétrico.

- a) Contactos en papel de los fotogramas en los que aparecen los puntos de apoyo, en los cuales se habrá marcado un círculo con lápiz grueso rodeando la zona próxima al punto, además de anotarse su numeración. El punto de apoyo debe estar pinchado, al menos en el fotograma central.
- b) Listado de coordenadas de los puntos de apoyo, el cual será entregado en formato digital y en papel.
- c) Reseña de cada uno de los puntos de apoyo. En la cual se facilita la siguiente información:

- ✓ Número del punto y coordenadas X, Y, Z en el sistema de referencia del proyecto.
- ✓ Reseña literal que describe la posición del punto en el fotograma. Se utilizan frases concisas y precisas (centro de mata, cota suelo, esquina sureste de caseta).
- ✓ Croquis de situación. La reseña literal acompaña a un dibujo a mano alzada posición exacta indicada por una cruz. Se debe indicar la orientación del mismo, generalmente están orientados al norte.
- ✓ A veces también se acompaña una fotografía del punto en el momento de la observación que puede ayudar a clarificar su posición en caso de duda.

En el siguiente gráfico (ver figura 6) se muestra una reseña de campo de los puntos de apoyo siendo este un documento imprescindible para localizar de forma exacta la posición en el fotograma, de manera que la observación fotogramétrica sea lo más precisa posible.

<p>X= 414206.748 Y= 4279740.264 Z= 689.231</p> <p>Punto.. #01</p>	<p>Esquina arqueta de hormigon. Cota suelo.</p> <p>Fotograma n\U+25546 Pasada n\U+2551</p>	
<p>X= 414562.580 Y= 4279471.486 Z= 681.163</p> <p>Punto.. #02</p>	<p>Centro de pilar de Hito mojonado. Cota suelo.</p> <p>Fotograma n\U+25546 Pasada n\U+2551</p>	
<p>X= 414844.162 Y= 4279287.718 Z= 682.035</p> <p>Punto.. #03</p>	<p>Esquina interseccion de hormigon de isleta con asfalto. Cota suelo.</p> <p>Fotograma n\U+25546 Pasada n\U+2551</p>	
<p>X= 413905.296 Y= 4279253.524 Z= 675.920</p> <p>Punto.. #04</p>	<p>Esquina interseccion de margen de camino con sembrado. Cota suelo.</p> <p>Fotograma n\U+25546 Pasada n\U+2551</p>	
<p>X= 414189.885 Y= 4279001.743 Z= 675.352</p> <p>Punto.. #05</p>	<p>Esquina de caseta en explanada. Cota techo caseta.</p> <p>Fotograma n\U+25546 Pasada n\U+2551</p>	

Figura 6. Reseña de campo de los puntos de apoyo

Fuente: Fotogrametría III. Juan A. Pérez A. (2001).

2.3.4 Aerotriangulación

La Aerotriangulación se conoce también como triangulación aérea o fototriangulación (término general, ya que incluye procedimientos aplicados a fotos

aéreas y terrestres); tiene por objeto obtener las coordenadas de diversos puntos del terreno mediante los procedimientos de la fotogrametría.

Fue concebida para efectuar los levantamientos topográficos por medio de la fotografía, reduciendo al mínimo los trabajos a realizar en campo. Necesita no obstante, apoyarse sobre puntos de posición conocida en el terreno y que tendrán que determinarse en campo por métodos geodésicos y topográficos.

El objetivo de la aerotriangulación es obtener la posición del mayor número posible de estos puntos de apoyos mediante operaciones fotogramétricas de gabinete, reduciendo por tanto los trabajos a realizar en campo.

La triangulación aérea posee ciertos beneficios al momento de aplicarla al proyecto fotogramétrico, los más importantes son:

- **Desarrollo del trabajo en la oficina:** Con la posibilidad de agilizar y disminuir los costos de los trabajos de campo debido a la reducción de puntos de control o puntos de apoyo que se deben de determinar, siendo sustituidos éstos por puntos de enlace medidos fotogramétricamente.
- **Medición indirecta:** La captura de datos es independiente de la orografía del terreno o de la superficie en cuestión. Asimismo, los problemas de accesibilidad al medio se limitan al trabajo de campo.
- **Detección de errores groseros:** en las mediciones geodésicas-topográficas y fotogramétricas. La aerotriangulación en sí misma es un filtro de calidad y garantía.
- **Homogeneización:** en la precisión del trabajo.

En aerotriangulación es común denominar a los puntos determinados en campo como puntos de control. A los puntos que se determinan mediante aerotriangulación se denominan puntos enlace y paso. En ocasiones se denominan puntos de control mayores (puntos determinados en campo) y puntos de control menores (puntos obtenidos por aerotriangulación).

Se llama «pasadas» (bandas o fajas) al conjunto de fotografías efectuadas por el avión en la dirección del vuelo. Con el nombre de «bloque» al conjunto de fotografías o modelos que componen el vuelo fotogramétrico que recubre una determinada zona objeto del trabajo. Como «puente» al conjunto de fotografías, parte por lo general de una pasada y/o bloques de fotos, con puntos de control (apoyo) en ambos extremos, y que va a ser objeto del proceso de aerotriangulación.

2.3.4.1 Fases de la Aerotriangulación

El proceso de aerotriangulación usualmente consta de las siguientes fases:

- I. Preparación del bloque donde generalmente seleccionamos las imágenes fotográficas, definimos las pasadas, analizamos los recubrimientos (longitudinales y transversales) y recopilamos información de las cámaras y de los puntos de apoyo.
- II. Determinación de los puntos de paso, que son aquellos puntos de conexión de imágenes pertenecientes al bloque. Esta fase se subdivide en tres operaciones:
 - a. Identificación y selección de puntos de paso en los emplazamientos estándar y asignación de nombres o números únicos.

- b. Transferencia de puntos homólogos mediante un transferidor de puntos o por medio de técnicas de correspondencia (correlación).
 - c. Medida de las coordenadas imagen de los puntos de paso. La transferencia y la medición de los puntos de paso pueden realizar monoscópica o estereoscópicamente, en restituidores analíticos o digitales, y de manera manual, o semiautomática o automática.
- III. Medición de las coordenadas imagen de los puntos de apoyo en todas las imágenes en las que aparecen. A esta tarea también se la conoce como con el nombre de adquisición de puntos de apoyo.
- IV. Compensación del bloque, a partir de cualquier de los métodos de compensación existentes. Esta fase lleva asociada labores de corrección y análisis de los datos, detección de errores groseros, depuración de los resultados y determinación de los parámetros.

A continuación se muestran en las figuras 7, 8, 9 y 10: a) los puntos de control planimétricos y altimétricos, siendo estos los tomados en campo; b) puntos de control distribuidos idealmente con recubrimiento transversal del 20 al 30%; c) la identificación de los puntos de paso al cual se les asigna una enumeración de forma particular para cada fotografía; y d) un bloque fotogramétrico enumerado con puntos de enlace y puntos de control definiendo las pasadas.

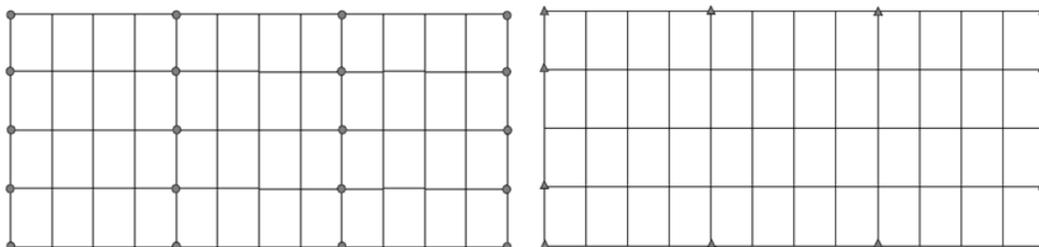


Figura 7. A) Puntos de control Planimétrico y altimétricos

Fuente: Fotogrametría III. Juan A. Pérez A. (2001)

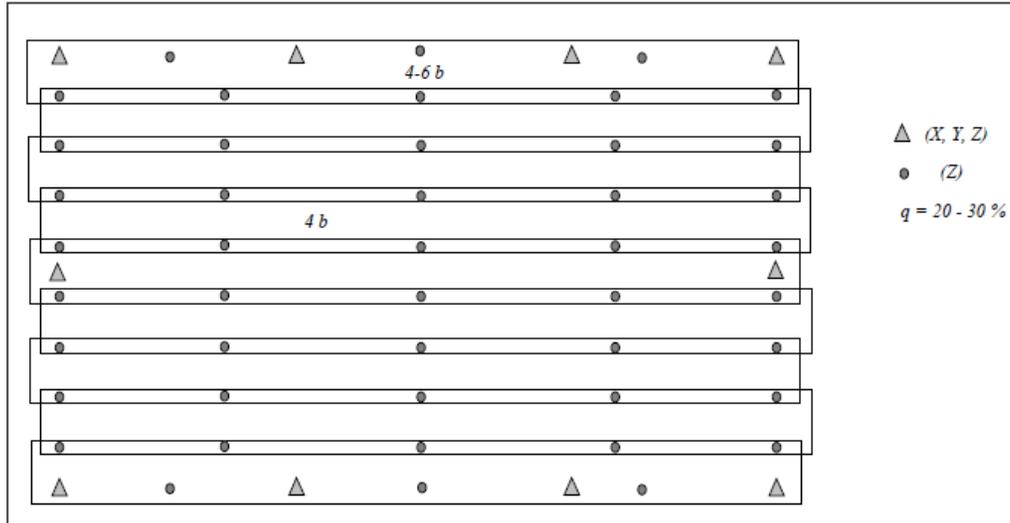


Figura 8. B) Distribución ideal del apoyo topográfico (puntos de control)

Fuente: Fotogrametría III. Juan A. Pérez A. (2001)

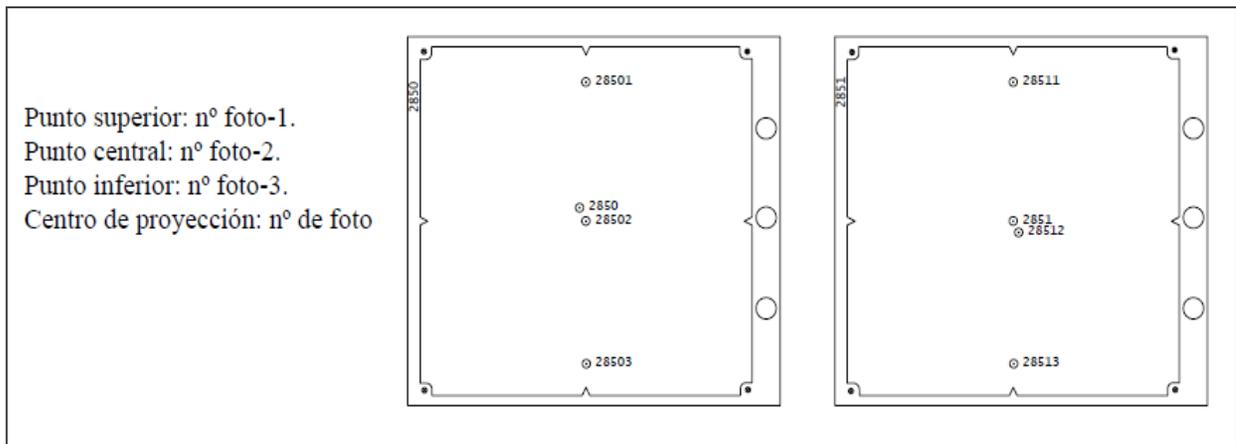
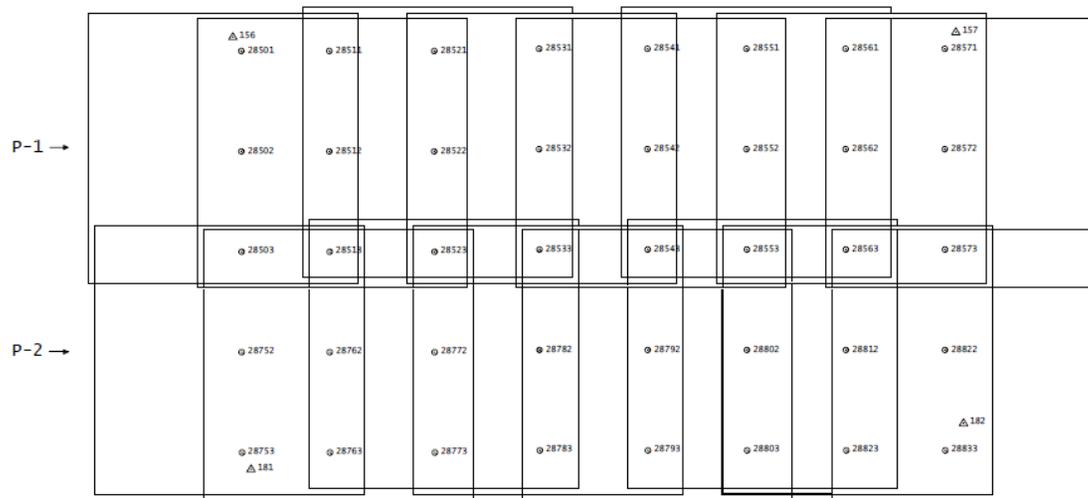


Figura 9. C) Numeración de puntos de las fotografías para el proceso de aerotriangulación

Fuente: Fotogrametría III. Juan A. Pérez A. (2001)



MÉTODO	FASE INSTRUMENTAL			FASE ANALÍTICA	
ANALÓGICA	Formación de los Haces	Formación del Modelo y Medida de Coordenadas	Formación de la Pasada	Compensación de Pasadas (Independientes)	Compensación de un Bloque de Pasadas
				Compensación en bloque de pasadas	
SEMIAUTOMÁTICA	Formación de los Haces	Formación del Modelo y Medida de Coordenadas	Formación de la/s Pasada/s	Compensación de Pasadas (Independientes)	Compensación de un Bloque de Pasadas
			Compensación en Bloque con Pasadas		
			Modelos o Secciones	Compensación en Bloque a partir de Modelos o Secciones	
ANALÍTICA	Medida de Coordenadas Placas	Formación de los haces y del Modelo	Formación de la/s Pasada/s	Compensación de Pasadas (Independientes)	Compensación de un Bloque de Pasadas
			Compensación en Bloque con Pasadas		
		Modelos o Secciones	Compensación en Bloque a partir de Modelos o Secciones		
		Compensación en bloque con haces de rayos			

Figura 11. Esquema de la fase de adquisición y procesamiento de datos según Jordan Eggert y Kneissal

Fuente: Fotogrametría III. Juan A. Pérez A. (2001)

2.3.4.2 Clasificación de los métodos de la aerotriangulación

Existen diversos criterios para establecer la clasificación de los métodos de aerotriangulación, cada uno de ellos tiene sus condicionantes como puede ser el instrumental necesario para su aplicación y cálculo.

Respecto de la unidad de trabajo:

- Modelos aislados.
- Pasada simple.
- Bloque de pasadas.
- Bloque de secciones.

Respecto al control terrestre:

- Con control geodésico.
- Sin control geodésico.

Respecto al modo de operar (es la clasificación más utilizada):

- Planimetría o Radial:
 - ✓ Gráfica.
 - ✓ Numérica.
 - ✓ Mecánica.
- Espacial (X, Y, Z):
 - ✓ Analógica: triangulación por pasadas o aeropoligonación.
 - ✓ Semianalítica: modelos independientes.
 - ✓ Analítica: secuencial o simultánea.

Los métodos espaciales son los que se han venido utilizándose desde los años 60 hasta hoy en día. A continuación, de manera breve, se plantea su procedimiento en la aerotriangulación.

Los procedimientos analógicos incluyen la realización manual de la orientación relativa y absoluta de los modelos, utilizando instrumentos de restitución provistos de intercambiadores de bases y caminos ópticos, seguido de la medición de las coordenadas instrumentales (modelo). El ajuste posterior, para obtener las coordenadas bloque, se hace de forma gráfica o de forma analítica.

En la aerotriangulación semianalítica se hace solamente la orientación relativa (formación del modelo estereoscópico se realiza de forma analógica) y la medida de las coordenadas en el restituidor (instrumentos universales). La orientación absoluta se hace de forma analítica, así como el ajuste y determinación de las coordenadas bloque.

El método analítico consiste en la medición de coordenadas fotográficas seguido de la determinación analíticamente de las orientaciones relativa y absoluta y de las coordenadas bloque ajustadas.

2.3.4.3 Aplicaciones de la aerotriangulación

El desarrollo de la aerotriangulación se debe principalmente a la necesidad de disminuir la dependencia de la fotogrametría de la topografía, con el fin de agilizar las ejecuciones cartográficas reduciendo las necesidades de control terrestre, siendo esta su principal aplicación.

Existen una gran cantidad de aplicaciones en diversos ámbitos, tanto en la cartografía como también para la determinación de Modelos Digitales de Terreno,

densificación de redes, y otras de interés en obtención de series de puntos con gran precisión. Entre las que destacan, se exponen a continuación:

- **Cartografía**

Mediante la aplicación de los métodos de triangulación aérea se reduce el número de puntos de control necesarios y también la dependencia de la distribución del mismo con la consiguiente agilización de los mismos.

La aplicación de la aerotriangulación en las ejecuciones cartográficas no solo se reduce a la reducción del número de puntos de control necesarios, que justificaría su empleo, sino que también facilita una serie de tareas durante la orientación absoluta.

- **Modelos Digitales del Terreno (MDT)**

La adquisición de datos para mapas digitales puede hacerse durante la triangulación aérea especialmente para modelos digitales altimétricos.

Estos son un producto independientes para aplicaciones posteriores en proyectos de ingeniería. Son básicos para un plan nacional de ortofotografía y rectificación de imágenes escáner desde el espacio. A partir de ellos se puede realizar el curvado automático sustituyéndolo por el convencional.

2.3.5 Orientación de las Fotografías Externa e Interna como parte del proceso fotogramétrico

En este proceso se cuenta con apoyos de fotografías y puntos de control, en el cual las fotografías se someten a un proceso de normalización y orientación interna, luego mediante los puntos de apoyo se realiza la orientación externa, lo que induce a una generación automática de modelos digitales de terreno (MDT) y un mosaico del mismo y finalmente se realiza el control de error. Por medio de este proceso se obtienen el resultado final, la estadística de error y la confiabilidad.

a) Orientación Interna

La orientación interna consiste en el proceso fotogramétrico que permite la reconstrucción de los haces de rayos de características homólogas a las imperantes en la cámara fotográfica que originó esas imágenes. En otras palabras, mediante la orientación interna se trata de reconstruir los haces de rayos de una imagen. Para ello es necesario conocer:

- Focal calibrada
- Posición del punto principal
- Posición de las marcas fiduciales
- Función de distorsión

Desde un punto de vista analítico lo que se está haciendo es reconstruir el sistema de referencia imagen y establecer los parámetros de transformación entre el sistema de coordenadas instrumental e imagen. De manera gráfica se puede apreciar en la figura 12 que sigue.

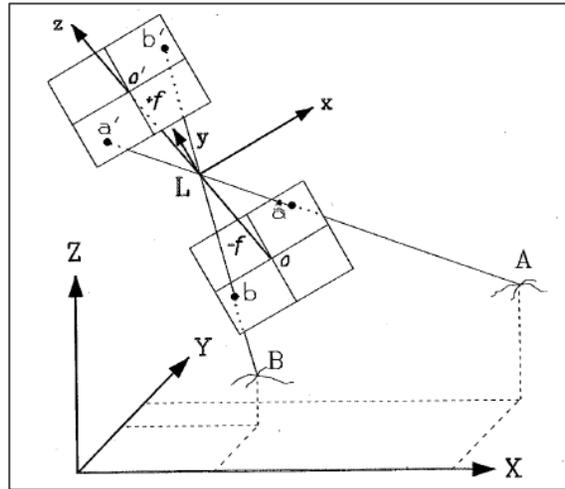


Figura 12. Sistema espacial de coordenadas imagen (x, y, z), sistema de coordenadas terreno/objeto (X, Y, Z) e imágenes de los puntos A y B en el positivo (a, b) y en el negativo (a', b'); punto principal en el positivo, o , y en el negativo, o'

Fuente: Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital, José Luis Lerma García. UPV Valencia (2002)

b) Orientación Externa

La orientación externa dirige los rayos formados en el instrumento fotogramétrico, genera el modelo estereoscópico y a sus puntos les aporta idénticas características geométricas y de ubicación que a las correspondientes del terreno.

En otras palabras, mediante la orientación externa se trata de reconstruir (a escala) las condiciones de la toma fotográfica (posición de la cámara en el momento de la toma).

Se efectúa mediante dos procesos, mutuamente dependientes en algunos casos, o bien pueden realizarse en un solo paso. Por ello en la práctica son reiterativos. Constituyen dos subtipos de orientaciones:

- *Orientación Relativa (Formación del modelo)*

Consiste en el procedimiento mediante el cual se trata de obtener la intersección de los pares de rayos homólogos. Así se forma el modelo plástico tridimensional (en el espacio). Para la realización de esta fase de orientación es necesario disponer de los siguientes datos:

- ✓ Los parámetros de orientación interna de la cámara.
- ✓ Las relaciones entre los sistemas de coordenadas de imagen y píxel.
- ✓ El orden de las imágenes.

En la actualidad la orientación relativa se hace de un modo analítico o matemático. Se puede esperar de la siguiente manera:

- ✓ Que la paralaje P_y se anule en el espacio imagen en al menos cinco pares de puntos homólogos.
- ✓ Que al menos cinco pares de rayos homólogos sean coplanarios.

A continuación, se muestra gráficamente (ver figura 13) para mayor comprensión, la relación entre la orientación relativa y la condición de coplanaridad, la cual establece que los centros de proyección (izquierdo y derecho: L , L') en dos fotografías, un punto cualquiera del terreno (A) y sus puntos homólogos correspondientes en las imágenes fotográficas (izquierda a_i y derecha a_d) se encuentran en el mismo plano.

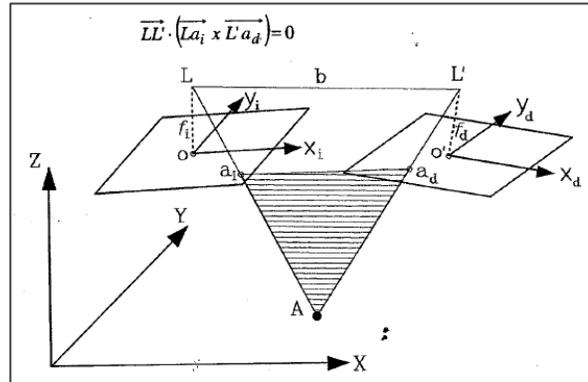


Figura 13. Condición de coplanaridad y orientación relativa

Fuente: Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital, José Luis Lerma García. UPV Valencia (2002)

Para cada punto sobre el modelo se puede escribir una ecuación de coplanaridad. El número de parámetros a determinar es alrededor de seis puntos, de manera que si elegimos esos puntos del modelo bien distribuidos, según el modelo de Von Gruber, y eliminamos la paralaje en cada uno de ellos, habrá quedado eliminada a su vez en cualquier otro punto del modelo. En la figura 14 que sigue se visualiza un ejemplo conciso del resultado del proceso.

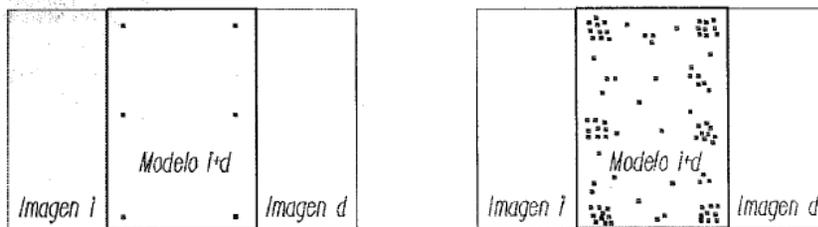


Figura 14. Disposición espacial de puntos homólogos a medir para la formación del modelo:
a) selección manual; b) selección automática por medio de técnicas de correspondencia

Fuente: Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital, José Luis Lerma García. UPV Valencia (2002)

En conclusión este procedimiento tiene por ventajas, su velocidad y el no poseer pérdida de precisión. Asegura zonas bien definidas y en los que se puede esperar unas buenas características.

- *Orientación Absoluta (Ajuste del modelo al sistema de referencia)*

La orientación absoluta es un procedimiento mediante la cual se trata de aportar al modelo una escala adecuada, ubicarlo planimétricamente en la posición que le corresponde y nivelarlo, para determinar su ubicación altimétrica con respecto a un plano de referencia. Es decir el proceso de nivelar, dar escala y ubicación planimétrica al modelo. Para ello se realizan dos operaciones:

- ✓ Colocar el modelo a una escala prefijada.
- ✓ Realizar la orientación absoluta: colocar el modelo en el espacio.

Se trabajan con tres tipos de escala:

- ✓ Escala de la imagen: es la escala fotográfica o de imagen.
- ✓ Escala de restitución o escala de minuta.
- ✓ Escala del modelo; valor comprendido entre los anteriores.

La orientación absoluta consiste en colocar perpendicularmente las verticales del modelo; esto se debe al que el modelo está desnivelado y sus verticales no están colocadas paralelas al eje z del sistema instrumental. Para realizar esta orientación es preciso utilizar lo que se conoce como puntos de apoyo.

Desde el punto analítico, la orientación absoluta equivale a realizar una transformación de semejanza espacial de siete parámetros entre el sistema modelo y el sistema terreno (figura 15).

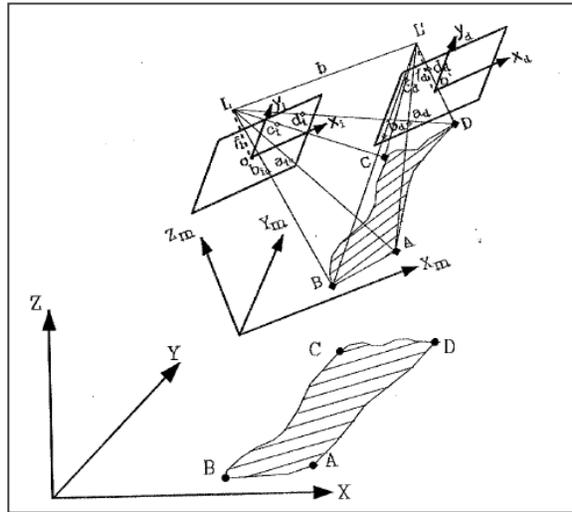


Figura 15. Orientación absoluta de un modelo

Fuente: Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital, José Luis Lerma García. UPV Valencia (2002).

2.3.5.1 Geometría Epipolar (normalización de imágenes)

La mayor parte de los algoritmos de fotogrametría digital parten de la premisa de que el par de imágenes estéreo se ha tomado según una geometría epipolar, ésta condición se cumple cuando los dos ejes de la cámara de un sistema estereoscópico son paralelos entre sí y perpendiculares a la base (caso ideal de toma fotográfica).

Las condiciones de vuelo durante la toma de fotografías no suelen generar esta «condición ideal», es decir su ruta no es totalmente recta, además de las condiciones atmosféricas y otros factores que intervienen, por lo que las fotografías no suelen tener el mismo ángulo de inclinación unas respecto a las otras. Es por ello que deben pasar por un proceso de normalización, cuyo resultado final es el de conseguir que los ejes de abscisas sean, en ambas imágenes, iguales.

La siguiente figura (ver figura 16) muestra la geometría epipolar en un par fotográfico. La primera imagen (a), representa el par estereoscópico original tal y como se tomó, mientras que la imagen (b) es su posición normalizada. C' y C'' representan los dos centros de proyección y la unión de ambos es lo que se llama la base aérea; P es un punto objeto para la definición del plano epipolar, P' y P'' son sus proyecciones; e' y e'' son rayos o líneas epipolares, es decir, las intersecciones del plano epipolar con las fotografías.

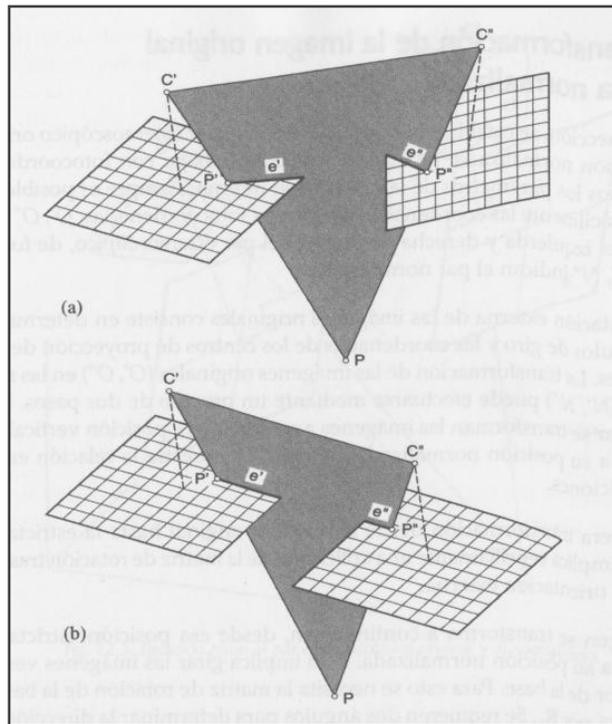


Figura 16. Geometría Epipolar: a) Imágenes originales; b) Imágenes normalizadas

Fuente: Apuntes Fotogrametría III. Juan A. Pérez A. (2001)

Se denomina imagen normalizada a aquella imagen construida con geometría epipolar en el espacio objeto, frente al concepto de imagen real que será aquella

tomada en el momento de la exposición. La imagen que es paralela al plano XY del espacio objeto recibe el nombre de imagen verdaderamente vertical (imagen ideal). En una imagen normalizada las líneas epipolares son paralelas y los puntos epipolares se encuentran en el infinito.

Muchos algoritmos de correlación utilizan imágenes normalizadas o epipolares. En el caso de usarse imágenes normalizadas el problema de la correlación se reduce al caso de una sola dimensión, estrategia que reduce considerablemente la complejidad de los algoritmos. En un modelo de imágenes normalizadas solamente existen paralajes horizontales, los paralajes verticales se han eliminado durante el proceso de orientación y por tanto la correlación es unidimensional, al tener todos los puntos homólogos igual valor para la ordenada.

2.3.5.2 Remuestreo

El remuestreo hace referencia a lo que le ocurre a una imagen tras haber sufrido una transformación geométrica. Eso quiere decir que, cuando una imagen es sometida a dicha transformación, los píxeles se ven afectados, no coincidiendo con la posición de los de la imagen original, por lo tanto ocurre un cambio de la resolución de una imagen de mapa de bits, en algunos casos teniendo que añadir o disminuir el número de píxeles que la forman, según sea el cambio del tamaño de la imagen original.

Tras sufrir estas transformaciones, las imágenes suelen perder calidad, por lo que es necesario someterlas a una interpolación para su suavizado. Hay diversos métodos para ello:

- Método del vecino más próximo:

Este método se llama así por situar en cada cuadrado de la malla de la imagen el valor de gris del píxel más cercano en la imagen original. Esta es la solución más rápida y su principal inconveniente está en la distorsión que introduce en rasgos lineales de la imagen como carreteras, caminos, entre otros.

- Interpolación bilineal:

Este método supone promediar los niveles de gris de los cuatro píxeles más próximos de la imagen original. Este promedio se pondera según la distancia del píxel original al corregido; teniendo mayor influencia los píxeles más cercanos de la imagen original. Reduce el efecto de distorsión en los rasgos lineales, pero tiende a difuminar un tanto los contrastes espaciales de la imagen original.

- Convolución cúbica:

Considera los niveles de gris de los 16 píxeles más próximos. El efecto visual es más correcto que los anteriores pero supone un volumen de cálculo mucho mayor.

Analizando los tres métodos de remuestreo mencionados, se concluye que el método del vecino más próximo es el más simple, distinguiéndose por su rápida ejecución en cuanto a cálculo se refiere, pero geoméricamente hablando es el menos adecuado, con una precisión de ± 0.5 píxel. Los otros dos métodos restantes tienen una mayor precisión geométrica pero se requiere mayor trabajo en el cálculo. El método de convolución cúbica es el que absorbe mayor tiempo. En casos generales, el más utilizado es el método de interpolación bilineal. La elección del método más idóneo dependerá de la finalidad del proceso y de los recursos disponibles. El más preciso de todos es el método de la convolución que

tiene un 0,3 % de error de interpolación. La interpolación bilineal tiene un valor de error del 3,7 % y el procedimiento del vecino más próximo del 15,7 %.

2.3.6 Correlación Automática

La correlación automática, conocida también como correspondencia de imágenes (image matching), es el proceso de identificar y medir automáticamente detalles o entidades homólogas puntuales, lineales y superficiales de dos o más imágenes. Dichas entidades pueden hacer referencia a patrones sintéticos de imagen o a objetos del mundo real representados a partir de imágenes fotográficas.

La búsqueda de entidades homólogas se realiza aplicando una serie de métodos y estrategias donde su fiabilidad y precisión se indica por un valor denominado coeficiente de correlación. Por otro lado, la determinación de las coordenadas tridimensionales se realiza midiendo el paralaje estereoscópico, es decir, midiendo el desplazamiento de los puntos homólogos en dos fotogramas consecutivos.

La búsqueda de entidades conjugadas es proporcional, por un lado, a la resolución de cada una de las imágenes y, por otro, al porcentaje de recubrimiento.

La mayoría de las tareas automáticas en fotogrametría digital requieren correspondencia de imágenes, como en:

- Orientación interna: localización de marcas fiduciales.
- Orientación relativa: la localización y transferencia de puntos homólogos.

- Orientación externa (absoluta): la localización y medición de formas preestablecidas de puntos de apoyo.
- Generación de Modelos Digitales del Terreno: medición masiva de coordenadas terreno.
- Tareas de interpretación: identificación, localización, y extracción de objetos parametrizados.

2.3.6.1 Métodos de correlación automática

Los métodos de correlación calculan el coeficiente de correlación para poder determinar las entidades homologas, así mismo, este índice proporciona el grado de semejanza entre las entidades identificadas. Normalmente el coeficiente se calcula mediante una función, como puede ser el factor de correlación cruzado o la desviación típica en la correspondencia por mínimos cuadrados.

En general, cuando se trata de correlación se habla también de una correspondencia basada en intensidades, donde se asume que pixeles homólogos tienen valores radiométricos similares. Los tres métodos de correspondencia de imágenes que se utilizan son:

a) Correspondencia por áreas

Es un método basado en comparar las similitudes radiométricas de una pequeña subimagen o ventana, generalmente cuadrada y centrada en el píxel de interés,

con su correspondiente en la otra imagen del par, como se muestra a continuación (ver figura 17).

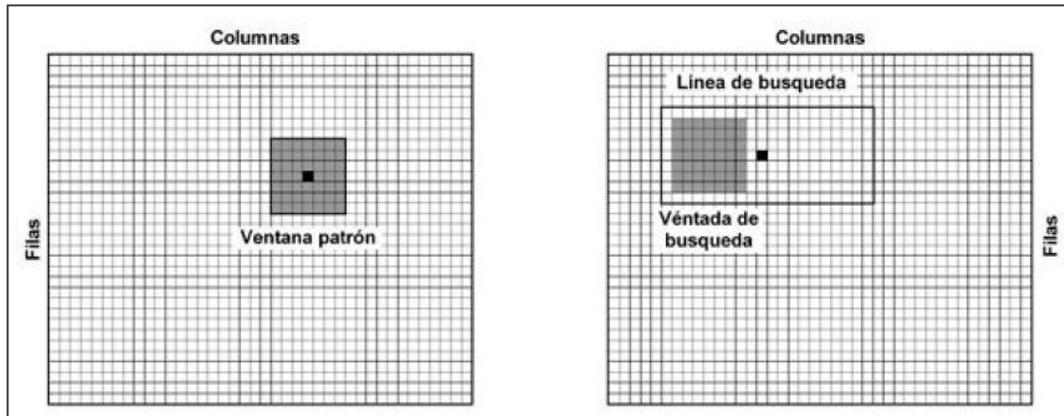


Figura 17. Concepto de correspondencia por área: Ventana de referencia en la imagen izquierda y ventana de búsqueda en la imagen derecha

Fuente: Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital, José Luis Lerma García. UPV Valencia Año 2002.

La similitud se evalúa calculando el coeficiente de correlación para diversos desplazamientos de la ventana y considerando el más idóneo el de valor máximo. Cabe resaltar, que al iniciar la búsqueda, este método necesita una mayor aproximación a la zona de correspondencia, por lo cual se necesita de los siguientes criterios para el cálculo del coeficiente:

- *Correspondencia por correlación cruzada:*

El coeficiente de correlación ρ es:

$$\rho = \frac{\sigma_{rb}}{\sigma_r \sigma_b}$$

Y sus términos son:

σ_{rb} : Covarianza entre la ventana de referencia y la ventana de búsqueda.

σ_r : Desviación típica de la ventana de referencia (patrón).

σ_b : Desviación típica de la ventana de correspondencia.

Cuanto más se aproxima el valor del coeficiente de correlación a la unidad, mayor semejanza existe entre ambas ventanas; un valor igual a cero implica que no existe correlación alguna. El signo negativo indica una correlación inversa, y ocurre cuando se trabaja simultáneamente con positivo/negativo entre las ventanas de referencia.

El modo operativo de la correlación cruzada consiste en ir desplazando la ventana de ajuste, que es una ventana de idéntico tamaño a la ventana de referencia, píxel a píxel a lo largo de la ventana de búsqueda y calcular simultáneamente el coeficiente de correlación hasta encontrar el valor máximo de correlación.

- *Correspondencia por mínimos cuadrados:*

La idea de este método es minimizar los cuadrados de las diferencias de los niveles de grises entre la ventana de referencia y la de búsqueda.

b) Correspondencia basada en entidades

El método consiste en determinar elementos o características homólogas de las imágenes a partir de sus atributos, tales como su forma, orientación, longitud,

curvatura, brillo medio, entre otros. Se trata de elementos que pueden ser puntuales, lineales, superficiales, como esquinas de edificios, intersecciones, bordes, entre otros.

Para su aplicación se distinguen dos fases: una primera donde se localizan los elementos de interés, independientemente en cada una de las imágenes, y sus atributos; y otra segunda donde se realiza la búsqueda y asignación de entidades homólogas.

c) Correspondencia relacional

Es una correspondencia basada en la detección y comparación de estructuras topológicas extraídas de las imágenes, como nodos, conexiones de líneas, relaciones entre objetos vecinos, entre otros.

2.3.6.2 Estrategias de correlación automática

Suelen surgir algunos problemas en la búsqueda de entidades homólogas que se quieren solucionar conjuntamente se vayan aplicando los métodos de correlación. Generalmente se tratan de problemas que dan lugar a falsas correlaciones o impiden la identificación.

A continuación se describen los problemas más destacados, seguidos de las estrategias a utilizar para su solución, estos son:

Problema: Los que se presentan con mayor frecuencia son los debidos a distorsiones radiométricas producidas por cambios de iluminación, ruidos y propiedades de reflexión, así como, las distorsiones geométricas debidas al relieve, a las variaciones de escala y a las áreas ocultas.

Solución 1): La suposición de considerar constantes los efectos atmosféricos y de iluminación en el momento de la toma, de obtener las imágenes empleando bandas espectrales idénticas y de conocer los valores referentes a la toma fotogramétrica (recubrimientos, distancias de la cámara al objeto, etc.), facilitan las tareas de correspondencia.

Problema: Cuando los métodos de correlación realizan la búsqueda, encuentran la dificultad de tener que trabajar sobre toda la imagen, lo que supone un cálculo excesivo, un elevado tiempo y la posibilidad de obtener más de una solución.

Solución 1): El problema se resuelve acotando el espacio de búsqueda, de forma que la correspondencia se inicie en las proximidades de la verdadera solución. Para ello, la búsqueda se reduce a la zona de recubrimiento, y más concretamente, empleando la geometría epipolar.

Solución 2): Otra forma de reducir el espacio de búsqueda es empleando imágenes jerárquicas o piramidales. Se trata de ir aproximándose al punto homólogo variando el tamaño del píxel, empezando por una resolución grosera de la imagen e ir mejorándola hasta llegar a la resolución original.

2.3.7 Generación automática de Modelos Digitales de Terreno (MDT)

El Modelo Digital de Elevación (MDE) debe generarse por correlación automática a partir de los pares estereoscópicos obtenidos tras el proceso de la aerotriangulación digital, realizándose la depuración y edición del mismo interactivamente. Se elegirán las estrategias de cálculo para la herramienta de autocorrelación, en función de las características del terreno encontrado en cada modelo.

Los aspectos a considerar en la generación de los MDE en fotogrametría son principalmente:

- El remuestreo de la imagen según una geometría epipolar (imágenes normalizadas).
- El empleo de las pirámides de imágenes.
- La utilización de métodos de correlación automática a nivel de área y elemento.
- Las técnicas de reconstrucción de superficies.

En el remuestreo epipolar de la imagen tiene por objetivo la obtención de nuevas imágenes (imágenes normalizadas), en las que exista paralelismo entre las líneas epipolares y las filas de la imagen digital, de forma que el espacio de búsqueda para la identificación de los puntos homólogos se reduzca de una región bidimensional a una zona aproximadamente unidimensional, reduciendo significativamente el tiempo de cálculo. En esta fase, se suelen realizar otras correcciones, tales como la corrección por refracción atmosférica, por la curvatura terrestre y la distorsión radial.

En un modelo de imágenes normalizadas solamente existen paralajes horizontales, las paralajes verticales han sido eliminadas en procesos de

orientación y por tanto la correlación es unidimensional, al tener todos los puntos homólogos idéntico valor para la ordenada de la imagen.

Para poder introducir la condición de geometría epipolar de una forma automática es necesario el introducir una estrategia de búsqueda de tipo jerárquico (de menor a mayor detalle). Un ejemplo de búsqueda jerarquizada lo constituyen las pirámides de imágenes, las cuales son muy utilizadas en fotogrametría como método para plantear un esquema de trabajo de aproximaciones debido a que el tamaño original de las imágenes el trabajo con las imágenes a tamaño real.

En los niveles superiores de la pirámide de imagen (imágenes con menor resolución) el modelo digital de elevaciones obtenido refleja los grandes rasgos del modelo estableciéndose en función de aquellas zonas de la imagen que son lo suficientemente representativas como para plantear la resolución de los procedimientos de identificación automática de puntos. Tras esta primera aproximación se dispondrá de unas características morfológicas iniciales del terreno, lo cual permitirá la introducción de dicha información en el proceso de correlación e ir refinando progresivamente los resultados.

En la actualidad la mayoría de los programas de generación de MDE plantean un esquema mixto de correlación, donde se emplea la correlación a nivel de elemento en las primeras iteraciones (niveles superiores de las pirámides) y a nivel de área en los últimos pasos, para el refinamiento del modelo.

Luego para una correlación final de los puntos homólogos se restringe geoméricamente a las filas de la imagen (geometría epipolar) y a unos ciertos límites de paralaje, obteniéndose los elementos candidatos mediante un proceso basado en la utilización de técnicas de estadística robusta para la eliminación de discrepancias.

La fase de reconstrucción de la superficie tiene como objeto la incorporación de discontinuidades del terreno (líneas de ruptura, de pendiente), así como la corrección de errores groseros causados por los errores en la identificación de los puntos homólogos y la existencia de obstáculos 3D.

El sistema más utilizado para la reconstrucción de la superficie es la modelización de la misma mediante técnicas de elementos finitos, así como la introducción de los principios de la estadística robusta (considera los errores groseros) con el objeto de eliminar errores de altura en puntos aislados y detectar las discontinuidades.

En cada nivel de la pirámide, la identificación de los puntos homólogos proporciona una densa nube de puntos de los que conocemos sus coordenadas terreno. En el MDE se definen los puntos de una malla regular a partir de la nube inicial de puntos y mediante un procedimiento de elementos finitos bilineales, con cuatro vecinos de malla por elemento. El proceso de interpolación considera la información de los puntos del terreno medidos, las curvaturas y las torsiones de los mismos.

Los valores de alturas debido a la existencia de elementos como árboles, edificaciones, entre otros, dan lugar a discontinuidades reales del terreno, ya que existen partes del terreno que no son visibles y, por tanto, no se pueden medir de forma directa, estos deben ser detectados y tenidos en cuenta, que por medio de limpieza o procesamientos de los filtros de estimación, logran ser eliminados. La única posibilidad es la eliminación de elementos aislados, como por ejemplo, unos límites máximos de diferencia de paralaje entre puntos vecinos del modelo, por tanto, cuando se detecta un importante cambio de cota se considerará como un punto anómalo y será eliminado del modelo.

2.3.7.1 Métodos de interpolación

Los modelos de malla regular requieren en su generación un segundo proceso, consistente en la realización de la interpolación, donde se calcula el valor de la variable elevación en los puntos de la malla del modelo a partir de los puntos medidos.

Se ha demostrado, que mientras que el procedimiento de captura de la información (en cuanto a densidad y distribución) sea la adecuada, los diversos métodos existentes de interpolación dan resultados muy parecidos.

Los métodos de interpolación pueden ser clasificados en cuatro grandes grupos:

- Métodos basados en el ajuste polinómico de elevado orden. Dentro de este grupo destacan los métodos basados en las medias móviles y los planos tangenciales móviles.
- Métodos basados en la utilización de elementos finitos.
- Métodos basados en la aplicación de estimaciones estadísticas que operan con funciones de covarianza o las propiedades de correlación del terreno.
- Método de Kriging, donde los cálculos son proporcionales a la inversa de la distancia y considera la variable en estudio como una variable regionalizada.

2.4 MODELOS DIGITALES DE TERRENO Y SUS DERIVADOS

El manejo eficaz y productivo de las estructuras de datos con una organización espacial sólo se ha hecho posible cuando se ha pasado del tratamiento manual al

uso generalizado de los medios informáticos. La cartografía digital abarca este amplio ámbito de tratamiento de la información y, dentro de la misma, los modelos digitales del terreno representan una parte con carácter propio que debe acotarse apropiadamente. Para ello se expone las características que los definen y separan del resto de la información territorial.

2.4.1 Concepto de Modelo

Según A. M. Felicísimo, la palabra modelo, originada en ámbitos geográficos, se define como una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades. Con lo cual se deduce que la versión de la realidad que se realiza a través de un modelo pretende reproducir solamente algunas propiedades del objeto o sistema original que, por lo tanto, se ve representado por otro objeto de menor complejidad.

Los modelos se construyen estableciendo una relación de correspondencia con la realidad cuyas variantes pueden producir modelos de características notablemente diferentes. Se distinguen tres tipos básicos:

- **Los modelos icónicos:** la relación de correspondencia se establece a través de las propiedades morfológicas; una maqueta es un modelo del objeto representado donde la relación establecida es fundamentalmente una reducción de escala.
- **Los modelos análogos:** poseen algunas propiedades similares a los objetos representados pero sin ser una réplica morfológica de los mismos; un mapa es un modelo de la realidad establecido mediante un conjunto de

convenciones relativamente complejo que conduce a un resultado final claramente distinto del objeto representado.

- **Los modelos simbólicos:** se llega a un nivel superior de abstracción ya que el objeto real queda representado mediante una simbolización matemática (geométrica, estadística, etc.).

2.4.2 Modelo Digital de Terreno (MDT)

Los Modelos Digitales del Terreno se incluyen en la categoría de modelos simbólicos, ya que las relaciones de correspondencia que se establecen con el objeto tienen la forma de algoritmos o formalismos matemáticos.

2.4.2.1 Concepto de MDT

Según Felicísimo (1994), los modelos digitales del terreno se definen como un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del territorio.

Un aspecto interesante es que la definición anterior permite que la característica a representar sea diferente de la altitud. Este aspecto, aunque en principio pueda parecer evidente, debe ser destacado ya que es habitual identificar los MDT con los modelos digitales de elevaciones cuando, en realidad, pueden ser representadas muchas otras propiedades del terreno, con lo cual reservaremos el término MDT para la denominación genérica.

En la definición de MDT se incluyen dos condiciones suplementarias. La primera es que debe existir una estructura interna que represente las relaciones espaciales entre los datos. La segunda es que la variable representada en el modelo debe ser cuantitativa y de distribución continua.

Por tanto, A. M. Felicísimo propone una definición de MDT más completa y precisa: un Modelo Digital de Terreno (MDT) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua.

2.4.2.2 Origen del MDT

El término digital «terrain model» tiene aparentemente su origen en el Laboratorio de Fotogrametría del Instituto de Tecnología de Massachusetts en la década de los años 50. En el trabajo pionero de Miller y Laflamme (1958) se establecen ya los primeros principios del uso de los modelos digitales para el tratamiento de problemas tecnológicos, científicos y militares. La definición del MDT que se menciona en sus trabajos es una representación estadística de la superficie continua del terreno, mediante un número elevado de puntos selectos con coordenadas xyz conocidas, en un sistema de coordenadas arbitrario. Puede observarse el uso del término MDT como sinónimo de MDE, así como el escaso énfasis en el aspecto de la georreferenciación, aunque más adelante indica la conveniencia de establecer una relación entre el sistema de coordenadas y un sistema de proyección geográfica.

En la década de los años 80, en trabajos del U.S. Geological Survey, surge programas destinados a generar simulaciones 3D de los datos que maneja información en formato matricial, y en general un número considerable de aplicaciones de bases muy diferentes. Se estandariza la información de un modelo

digital de elevaciones para los Estados Unidos, en formato matricial. Cabe destacar el uso del término Modelo Digital de Elevación (MDE), eliminando la ambigüedad del Modelo Digital de Terreno (MDT) de trabajos previos.

Los programas de manejo de modelos digitales están en la actualidad en pleno desarrollo, aunque aún intentando resolver satisfactoriamente problemas básicos. Entre ellos pueden citarse la estructuración idónea de los datos, la compatibilización de diferentes estructuras entre sí, la búsqueda de algoritmos eficientes para generar nueva información y el intercambio de ésta entre sistemas diferentes.

2.4.2.3 Propiedades fundamentales de los Modelos Digitales de Terreno

Los Modelos Digitales de Terreno presentan diversas propiedades que los distinguen y que son fundamentales para su entendimiento, estas se muestran de forma explícita a continuación:

- Los datos están representados en una estructura interna que almacena y vincula las unidades de información espacial entre sí.
- Modelan fenómenos geográficos y morfológicos a través de la representación de la distribución espacial de una variable.
- La variable representada debe ser cuantitativa y de distribución continua.

2.4.3 Modelo Digital de Elevación (MDE)

2.4.3.1 Definición de MDE

De acuerdo con la definición general de MDT, un modelo digital de elevaciones (MDE) se define, según A. M. Felicísimo, como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Un MDE puede describirse de forma genérica del modo siguiente:

$$z = f(x, y)$$

Donde Z es la altitud del punto situado en las coordenadas X e Y, y Z la función que relaciona la variable con su localización geográfica. Los valores de X e Y suelen corresponder con las abscisas y ordenadas de un sistema de coordenadas plano, habitualmente un sistema de proyección cartográfica.

2.4.3.2 Estructura de datos en el MDE

Los modelos se construyen básicamente según dos formas de organización de sus datos (Felicísimo, 1994):

- **Raster o cuadricular:** el territorio se muestra como un mosaico formado por una retícula regular de puntos a los cuales se les asigna el valor de la variable en la superficie que representa.
- **Vectorial:** basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos o vértices.

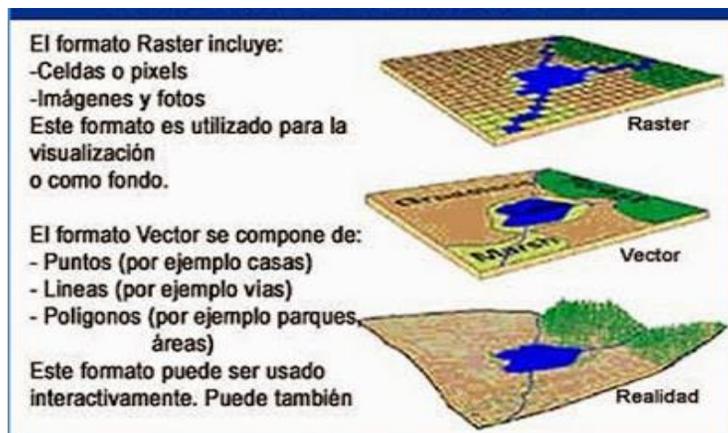


Figura 18. Propiedades de cada formato

Fuente: Curso de topografía. INEGI, (2015)

Dentro de estos dos grupos se distinguen otros tipos de estructuras de datos tal como se indica en la tabla 2, que se muestra a continuación:

Tabla 2. Resumen de las estructuras más usuales utilizadas para el almacenamiento de los modelos digitales de elevación

VECTORIALES	<i>CONTORNO</i>	<i>SECUENCIAL</i>	Las líneas se almacenan como cadenas de cotas
		<i>ANALÍTICA</i>	Las líneas se almacenan como segmentos de Bézier, polinómicos, etc.
	<i>PERFILES</i>	Cadenas paralelas de cotas en línea con altitud variable.	
	<i>TRIÁNGULOS</i>	Red de Triángulos Irregulares (TIN).	
RÁSTER	<i>MATRICES</i>	<i>REGULARES</i>	Cotas sobre una malla cuadrada de filas y columnas equidistantes.
		<i>ESCALABLES</i>	Cotas sobre submatrices jerárquicas y de resolución variable.
	<i>POLÍGONOS</i>	Cotas asignadas a teselas poligonales regulares (triángulos o hexágonos).	

Fuente: A. M. Felicísimo. Modelos Digitales de Terreno (1994)

a) Modelos Vectoriales

- *Estructura de Contornos*: El modelo está definido mediante vectores, compuestos por un conjunto de pares de coordenadas (x,y) que describe la trayectoria de líneas isométricas, como las curvas de nivel o líneas isohipsas, donde el número de elementos de cada vector es variable, el cual permite incorporar cotas puntuales sin introducir incoherencias estructurales.
- *Estructura de Triángulos, «Red de Triángulos Irregulares» (TIN)*: Una estructura de datos cada vez más utilizada, se compone de un conjunto de triángulos irregulares adosados. Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, y se unen sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferentes grados de detalle, en función de la complejidad del relieve.
- *Estructura de Perfiles*: La representación mediante perfiles suele citarse como una posibilidad, sin embargo, no se encuentran ejemplos que la utilicen. Esta estructura se representa mediante cadenas paralelas de cotas donde su altitud es variable.

b) Modelos Raster

- *Estructura de Matrices Regulares:* Se obtienen como resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media u otra propiedad media (del terreno) de cada celda, asociado dicho valor al punto medio de la misma. La retícula puede adoptar formas variadas y la más utilizada es una red regular de celdas cuadradas, de tamaño definido, donde cada dato se localiza según su situación con filas y columnas equiespaciadas en la matriz. Las matrices de altitudes suelen ser generadas por interpolación a partir de un modelo previo de contornos o por métodos fotogramétricos.
- *Estructura de matrices de resolución variable:* El interés en estas estructuras reside en la posibilidad de solucionar uno de los principales problemas de las matrices regulares, que emplean una resolución espacial constante, manteniendo en principio la sencillez conceptual y operacional. En este tipo de matrices los elementos pueden ser datos elementales o submatrices con un nivel de resolución diferente. Lo que hace una estructura, denominada «quadtree», es variar la resolución espacial de las celdas, aumentando su tamaño en zonas de menor complejidad y reduciéndolo en zonas de mayor complejidad.
- *Estructura de polígonos:* Los polígonos irregulares adosados o redes regulares hexagonales aducen en cada caso ventajas para aplicaciones concretas, como las cotas que se asignan a teselas poligonales, pero su uso no se ha generalizado hasta el momento.

A pesar de las diferentes alternativas vistas, la capacidad actual de los sistemas informáticos en la adquisición automática de gran cantidad de datos, así como, su rápido manejo y tratamiento, han hecho que, en la práctica, solo se utilicen dos de las estructuras anteriores: las mallas regulares raster y los TIN.

Autores como Felicísimo opinan, que tanto las mallas regulares como los modelos TIN proporcionan resultados muy parecidos y fidedignos en la representación de la topografía, aunque, estos últimos no permiten efectuar cálculos ni desarrollar modelos con la facilidad y rapidez de las matrices.

2.4.3.3 Métodos de captura de datos para generar el MDE

Los métodos más usuales de obtención de datos fuente para la generación de un MDT pueden dividirse básicamente en dos grupos: métodos directos, cuando la captura se realiza directamente sobre el terreno real; y métodos indirectos, cuando se utilizan documentos analógicos o digitales elaborados previamente (cartografía, fotografías, entre otros).

Dentro de estos dos grupos se distinguen otros tipos de métodos para la captura de datos, tal como se indica en la tabla 3 siguiente:

Tabla 3. Métodos de captura de datos para la construcción del MDE

DIRECTOS	ALTIMETRÍA	Altímetros transportados por plataformas aéreas.
	GPS	Global Positioning System, sistema de localización mediante satélites.
	TOPOGRAFÍA	Mediante estaciones topográficas con salida digital.
INDIRECTOS	RESTITUCIÓN	Origen digital: imágenes digitales captadas por satélites con diferentes ángulos de visión.
		Origen analógico: pares fotográficos convencionales (pancromático, color, infrarrojo).
	DIGITALIZACIÓN	Manual: mediante tableros digitalizadores.
		Automática: mediante scanners.

Fuente: A. M. Felicísimo. Modelos Digitales de Terreno (1994).

a) Métodos directos: altímetros, GPS y estaciones topográficas

Son métodos en los que se utilizan instrumentos que permiten realizar mediciones directas sobre los objetos reales. La elección del aparato más idóneo dependerá en cada caso, principalmente, del elemento a medir, así como, de la precisión y de la escala a la que se vaya a representar.

Se han incorporado los altímetros esperando resultados que hacen posible, al menos teóricamente, el registro directo de los datos altimétricos en formato digital. Las características de estos altímetros hacen de ellos aparatos extremadamente precisos. Su mayor ventaja reside en que se trata de un método de captación

remota de información por lo que la toma de los datos no está limitada por la accesibilidad de la zona.

Aunque los instrumentos clásicos, como calibres, rodetes, cintas métricas, etc., han quedado relegados a levantamientos especiales, todavía se sigue recurriendo a ellos para mediciones de pequeños objetos de los que no es necesaria una excesiva precisión.

Generalmente los equipos más empleados son las estaciones totales, equipadas con sistemas de medición electromagnética de distancias o medición láser, así como, los denominados sistemas de posicionamiento global (GPS). Su uso, sin embargo, tiene como inconveniente la necesidad de recurrir a una elevada inversión en recursos para realizar una toma de datos precisa y, en el caso del GPS, su limitación en zonas arboladas o con edificaciones. En ocasiones se utilizan solo como un recurso de apoyo a otros sistemas de captura.

Actualmente, se está desarrollando un nuevo sistema que permite la captura de un gran número de puntos en un tiempo mínimo, mediante barridos láser. Los aparatos utilizados son los llamados Laser Escáner 3D.

b) Métodos Indirectos

Dentro de este grupo pueden citarse, entre otros, los métodos de digitalización de mapas, de forma manual o automática; los métodos de restitución fotogramétrica, con estereo-imágenes analógicas o digitales; y la interferometría radar.

- *Digitalización de Mapas:*

La digitalización ha sido uno de los métodos más empleados para la obtención de cartografía digital aprovechando los mapas existentes. Tradicionalmente el

proceso se realizaba de forma manual con un tablero digitalizador sobre el que se colocaba el mapa, sin embargo, debido a la lentitud en la etapa de digitalización y su elevado costo, se han desarrollado alternativas de digitalización automática.

En la digitalización automática la información del documento original es capturada por un escáner, vectorizada y posteriormente editada. El principal problema que surge con este método es que los originales suelen ser complejos, con más información de la estrictamente deseable, lo que implica que la fase de revisión y corrección sea muy lenta y costosa, hasta el punto de tener un rendimiento menor que la digitalización manual.

- *Restitución Fotogramétrica:*

Los sistemas fotogramétricos se basan en mediciones sobre pares estereoscópicos de la zona a estudiar. Según el método de extracción de la información puede hablarse de restitución numérica, analítica o digital, pudiendo ser ésta última manual, automática o semiautomática.

Cuando la captura se realiza de forma manual el proceso es lento y laborioso y por tanto costoso, lo que obliga a que se reduzca el número de puntos a tomar. No obstante, estos puntos suelen localizarse en las zonas de mayor interés y estar medidos con gran precisión.

Por el contrario, si se emplea un sistema fotogramétrico digital automático, el tiempo de medida de cada punto queda reducido drásticamente, permitiendo capturar gran cantidad de puntos. Posiblemente muchos de estos puntos no estén dispuestos de la manera más idónea e incluso tengan errores de medida, sin embargo, al aplicar a posteriori procedimientos estadísticos de filtrado de errores, y realizando una etapa de edición y depuración, el modelo resultante tendrá la suficiente precisión y calidad requerida.

- *Interferometría radar:*

La idea consiste en estimar la altitud del terreno mediante la medida de fase en imágenes radar.

2.4.3.4 Comprobación de la Calidad de los MDE

Uno de los aspectos que influye en la calidad de los MDE es el valor de error de la nube de puntos que los definen. Dicho error es la diferencia entre el valor medido y el valor real o verdadero (no siempre conocido) del punto, siendo este considerable cuanto mayor sea la diferencia. Si el error es superior a las precisiones requeridas se tratará de un error grosero que habrá de ser eliminado o corregido.

Son varios los factores que influyen en la aparición de errores. Las principales fuentes de error surgen en la toma de los puntos de apoyo, en el proceso de orientación fotogramétrica y en la captura automática de los puntos que conforman el MDE.

Los errores en los MDE pueden ser separados en dos categorías; los errores posicionales o cartográficos, deficiencia en la localización geográfica de elementos (puntos, líneas o polígonos), y los errores atributos o temáticos, suponen una asignación imprecisa en el atributo cartografiado (altitudes, población o cualquier otra característica).

En la fase de orientación la precisión a obtener dependerá de la calidad de los puntos de apoyo y de cuan buena sea su identificación en el par estereoscópico. Es recomendable que el número mínimo de puntos a emplear sea de seis, para contar con más datos de los estrictamente necesarios y poder determinar el error

en esta fase, y que los puntos a utilizar estén distribuidos de la forma más apropiada.

En cuanto a la fase de autocorrelación los errores se suelen producir por una falsa detección de las entidades homólogas, debido por lo general a un bajo contraste de las imágenes, a la existencia de texturas repetitivas o a reflejos. Su presencia puede ser detectada por el valor del coeficiente de correlación, sin embargo, este índice no aporta la cuantía en la que se produce el error, por lo que es necesario buscar estrategias que permitan evaluarlo y de igual modo que permitan determinar la calidad del MDE.

Lógicamente, luego de la detección de errores viene la fase de corrección, donde el dato erróneo debe ser rectificado. En el caso de modelos vectoriales, este proceso podría limitarse ocasionalmente a la eliminación del dato sin pérdida apreciable de información. En los MDE matriciales, al contrario, es necesario sustituir el valor erróneo por el correcto ya que no es aceptable la existencia de huecos en la matriz.

La corrección de errores de naturaleza local puede realizarse manual, donde se introduce el dato correcto, una vez detectado el lugar conflictivo y contrastado su valor en una fuente de datos fiable, mediante un editor adecuado. También se puede realizar de forma automática, tal corrección usa algoritmos para estimar un valor aceptable (aunque no real) que sustituya al dato erróneo. La sustitución manual es, obviamente, el método idóneo ya que incorpora un dato correcto al modelo, mejorando la información. Sin embargo, la sustitución automática puede resultar útil en algunos casos, en los que se considere excesivamente trabajosa la labor de edición manual.

Los métodos de sustitución usan algoritmos de interpolación que obtienen un valor coherente derivado del contexto del punto problema. El objetivo es conseguir que

las pruebas de detección de errores, en una posterior ejecución, den de paso el nuevo valor y no lo consideren conflictivo.

2.4.4 Modelo Digital de Superficie (MDS)

El Modelo Digital de Superficie (MDS) muestra el terreno con los elementos existentes o presentes en la superficie terrestre, incluyen topes de vegetación, edificaciones, infraestructuras y el terreno propiamente.

2.5 EL DRON Y SUS APLICACIONES⁷

El uso de los drones o VANT contribuye a la obtención de datos espaciales en un periodo corto de tiempo y con una alta resolución espacial a un costo reducido. Anteriormente a su aparición, todo dependía de la disponibilidad de los satélites, de aviones tripulados o de la cartografía realizada a pie de campo.

2.5.1 Definición de dron o VANT

Se refiere a una aeronave que vuela sin tripulación, es decir, un vehículo sin tripulación reutilizable, capaz de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido, y propulsado por un motor de explosión o de reacción.

⁷ Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, (2015). *Los Drones y su aplicación a la Ingeniería Civil*. España – Madrid. Recuperado de publicaciones: <<http://www.fenercom.com/>>

Existen muchos términos y palabras con las que normalmente nos referimos a este tipo de aeronaves: drones, RPAS, UAV, VANT, etc; términos que muchas veces se utilizan indistintamente si bien entre ellos existen algunas diferencias conceptuales. A continuación trataremos de analizar cada uno de estos términos mediante una serie de definiciones.

Drone es sin duda el término comúnmente más empleado. Es una palabra de origen anglosajón que sirve para referirse tanto a las abejas zángano como al zumbido que hacen las mismas. Se utiliza dicho término para referirse a este tipo de aeronaves debido al sonido que muchas de ellas emiten durante el vuelo.

Dron es la castellanización del término drone y es la palabra empleada comúnmente en España para referirse a este tipo de aeronaves. Esta palabra ha sido recientemente admitida por la Real Academia Española de la Lengua al incluirla en la 23ª edición de su diccionario académico en el que se define dicho término como “aeronave no tripulada”. Es por ello que actualmente en castellano el término correcto sería dron (singular) y drones (plural), debiendo evitar el empleo del término inglés drone (singular).

RPA hace referencia a las siglas en inglés de aeronave dirigida (pilotada) por control remoto (Remotely Piloted Aircraft).

RPAS hace referencia a las siglas en inglés de sistema de aeronave dirigida (pilotada) por control (Remotely Piloted Aircraft System). Este término comprende tanto a la aeronave en sí misma como a su sistema de control (controladora + estación de control).

UAV hace referencia a las siglas en inglés de vehículo aéreo no tripulado (Unmanned Aerial Vehicle). Con este término se suele hacer referencia a aquellos aparatos que, a diferencia de los RPA, no son controlados remotamente por una

persona, es decir, que son capaces de despegar, navegar y aterrizar de forma automática en base a los parámetros que hayan sido previamente establecidos (en este tipo de vuelos es necesario que un piloto se encuentre en todo momento supervisando las operaciones, aunque el vuelo se realice de forma automática).

VANT hacen referencia a Vehículo Aéreo No Tripulado. Se trata del término español para referirse a los UAV, sin embargo, dicho término todavía no cuenta con una gran aceptación entre los hispanoparlantes.

UAS hace referencia a las siglas en inglés de sistema aéreo no tripulado (Unmanned Aerial System). Al igual que ocurre con RPA y RPAS, este término comprende tanto al vehículo aéreo no tripulado como a su sistema de control.

UCAV hace referencia a las siglas en inglés de vehículo aéreo no tripulado de combate (Unmanned Combat Aerial Vehicle). Es un término menos común que los anteriores y sirve para referirse a aquellos drones capaces de ser equipados con armamento.

Normalmente los términos UAV y UAS suelen ser empleados para referirse a los drones militares mientras que los términos RPA y RPAS se suelen emplear para denominar a los drones civiles.

2.5.2 Clasificación de Aeronaves

Se clasificarán de acuerdo a la forma en la que las aeronaves consiguen su sustentación en la atmósfera. En el siguiente esquema (ver figura 19) se plantea una posible clasificación simplificada que muestra los principales tipos de aeronaves.

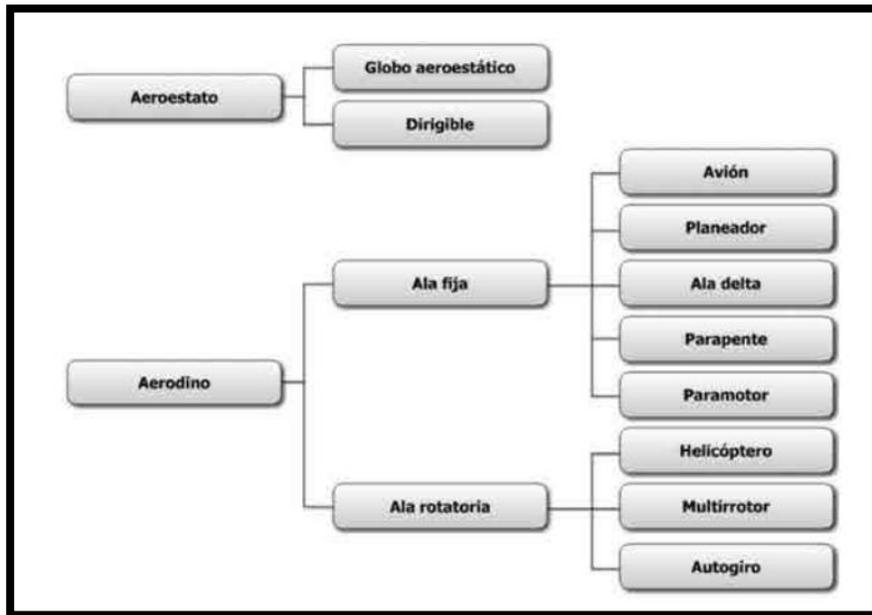


Figura 19. Clasificación de Aeronaves

Fuente: Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, (2015). *Los Drones y su aplicación a la Ingeniería Civil*.

2.5.3 Modos de operación

Existen cuatro modos posibles de operación en cuanto a la forma de pilotar una aeronave de forma remota.

2.5.3.1 Modo Manual

En este modo, el piloto remoto actúa sobre las superficies de control y la potencia del motor o motores, a través de una emisora de radiocontrol.

2.5.3.2 Modo Asistido

Es similar al modo manual, pero el piloto remoto no actúa directamente sobre las superficies de control o los motores, sino que indica sus intenciones (girar a la

derecha, subir, etc.) en su puesto de radiocontrol y actúa un autopiloto que las transforma en actuaciones sobre las superficies de control o los motores que consigan ese propósito.

2.5.3.3 Modo Automático

El piloto remoto establece un «plan de vuelo», es decir, un cierto número de puntos de paso «waypoints» de forma previa al inicio del vuelo. La aeronave cuenta con un autopiloto que ejecuta el plan previsto, sin embargo el piloto mantiene el control en todo momento, pudiendo modificar los puntos de paso durante el vuelo, ejecutar maniobras predeterminadas (como por ejemplo la «vuelta a casa» en caso de alerta) o incluso tomar el control directamente, bien sea de forma manual o asistida.

2.5.3.4 Modo Autónomo

Es similar al modo anterior, en cuanto que se establece un plan de vuelo predeterminado, pero una vez iniciado el vuelo la aeronave ejecuta el plan de forma totalmente autónoma, sin requerir la intervención del piloto incluso en caso de producirse situaciones de emergencia.

En el futuro es posible que incluso se elimine la necesidad de introducir plan de vuelo alguno, sino que la aeronave simplemente realice la misión completa, como puede ser seguir una infraestructura lineal mediante reconocimiento óptico, o dirigirse a un cierto punto evitando posibles obstáculos en el camino, etc.

2.5.4 Plan de Vuelo

El término plan de vuelo se refiere a la trayectoria que debe seguir el dron o VANT y no se refiere al documento que debe ser presentado a las autoridades que incluye datos como la identificación del avión, horario de salida u otras normas de vuelo.

Un plan de vuelo constará de varias fases o procedimientos (stages) que se deberán seguir en orden, entre las cuales están; Taking Off (despegue), Departure (salida), Arrival Route (ruta de llegada), Approach (acercamiento) y Landing (aterrizaje). Cada una de estas fases estará compuesta por series de legs; se trata de la trayectoria descrita por el avión para llegar a un punto desde el punto precedente, dos waypoint (posición geográfica definida en términos de latitud y longitud que debe sobrevolar el VANT).

2.5.4.1 Diseño del modelo del plan de vuelo

El plan de vuelo principal es aquel que incluye la ruta a seguir por el avión desde principio a fin. Otros planes de vuelo adicionales pueden ser incluidos como planes parciales, donde no todas las fases estarán incluidas. El propósito de los mismos es dotar al avión de rutas alternativas en caso de emergencia.

a) Fases o procedimientos

Las fases organizan los legs en secuencias, cada fase, excepto la primera y la última, tienen una precedente y otra que le sigue. Los diferentes tipos de fases que puede tener un plan de vuelo se detallan a continuación:

- Taxi: Desplazamiento hasta la pista.

- TakeOff: Legs usados durante el despegue.
- Departure Procedure: Comprende los legs del procedimiento de salida.
- Route: Legs para navegar desde un punto inicial hasta un punto destino.
- Surveillance: Legs a seguir durante una operación de vigilancia.
- ArrivalRoute: Contiene la ruta a seguir antes de iniciar la aproximación.
- Approach: Procedimiento de aproximación a la pista.
- Land: Operación de aterrizaje.

b) Legs (trayectorias)

Un leg especifica la trayectoria seguida por el avión entre dos waypoints. En el caso más simple la trayectoria será una línea recta pero para definir un plan de vuelo real es necesario poder definir de antemano otros tipos de trayectorias que permitan definir y ejecutar trayectorias más complejas. Un leg inicial será aquel que no tenga ningún leg previo. De la misma manera un leg final será aquel que no tenga ningún leg siguiente. A continuación se exponen las trayectorias básicas:

- Track to fix: se corresponde con una trayectoria en línea recta entre un waypoint y otro.
- Direct to fix: se corresponde con una trayectoria en línea recta desde cualquier área inicial. Es decir, ordena al VANT dirigirse directamente al waypoint destino sea cual sea la posición actual del avión en el momento de recibir la orden.
- Radius to fix: Definido como una trayectoria circular alrededor del centro de giro que termina en el waypoint destino del leg
- Hold Pattern: Define una trayectoria elíptica sobrevolando el waypoint destino del leg

c) Waypoints

Representa una localización donde el sistema de navegación del avión debe efectuar una transición automática entre un leg y otro.

Un waypoint no sólo recoge las coordenadas geográficas del punto a sobrevolar sino que además incluye datos como el tipo de transición que debe ejecutar el piloto automático al aproximarse al punto y datos de altitud y velocidad a las que se debe sobrevolar.

En cada waypoint se debe especificar qué tipo de transición se realizará. Existen dos tipos de transiciones básicas:

- Transiciones fly-by: aquellas en las que el sistema de navegación anticipa el giro hacia la trayectoria que especifica el siguiente leg.
- Transiciones fly-over: en las que el sistema de navegación sobrevuela el waypoint especificado antes de iniciar la maniobra hacia el siguiente leg.

2.5.5 Obtención de datos

Las nuevas herramientas tecnológicas permiten obtener datos con una resolución temporal reducida y con una alta resolución espacial, tanto de fotografías como de puntos.

Las imágenes tomadas son subortogonales, ya que rara vez son totalmente ortogonales. La precisión de los GPS de abordo es de varios metros, por lo que las precisiones de centímetros del trabajo final han de obtenerse mediante puntos

de control en el terreno. Estos puntos de control deben de repartirse homogéneamente sobre el territorio objeto de estudio, para obtener el mínimo error posible, además de realizar un reconocimiento del terreno para identificar las formas y elementos característicos del territorio.

La elección de la escala es fundamental. La escala apropiada será la que permita ver todos los elementos deseados claramente. Aun así, a la hora de realizar el vuelo, la altura del dispositivo no debe de ser muy elevada, aproximadamente por debajo de los 120m.

Dependiendo de los objetivos que se quieran alcanzar, la captura de fotografías puede ser desde cámaras digitales convencionales, con una focal fija o una cámara multispectral que capte la radiación en otras bandas del espectro electromagnético, todas deben de cumplir con una calibración de fábrica.

Otro punto importante en la toma de datos son las condiciones atmosféricas, las cuales afectan en gran medida ya que puede provocar errores en la captación de los datos. Por ello es fundamental la formación de los pilotos y en los manuales de los operadores disponer de procedimientos de vuelo condicionados a la meteorología.

2.5.6 Proceso de Gabinete

Una vez recogidos los datos se exportan a software especializados capaces de realizar procesamientos fotogramétricos y el posterior tratamiento de estos, creando una nube de puntos con coordenadas X, Y, Z, un Modelo Digital de Elevación (MDE) y composición de una ortoimagen georeferenciada.

Existen programas como Photoscan o Pix 4D que se encargan de generar un modelo con el conjunto de los datos obtenidos. Para procesar los datos, se debe de conocerse el sistema de coordenadas que se ha utilizado, la posición de cada una de las fotografías. Si las coordenadas son locales se deberá configurar previamente el *software* para no producir deformaciones en los resultados.

Según la resolución con la que se quiera trabajar se puede crear una nube de puntos más o menos densa. Cuantos más puntos, mayor información y mayor detalle, cuanto menos puntos menor resolución espacial. Esta nube de puntos permite realizar superficies y con ello analizar el terreno. Las superficies se crean a partir de un método de triangulación que genera el Modelo Digital de Superficie (MDS), y mediante técnicas de filtrado y algoritmos de programación, el Modelo Digital del Terreno (MDT), que pueden ser modificados por el usuario según su finalidad. Por último, la ortofotografía georeferenciada se crea a partir de la unión de numerosas fotografías creando un mosaico, conociendo sus coordenadas X e Y en el espacio.

Una vez generados estos modelos, se exportan a un programa software para modelar, analizar o diseñar. Para este cometido, existen diversos software especializados de diseño asistido como Autocad o Microstation, y software de Sistemas de Información Geográfica como ArcGIS, Quantum GIS, o Global Mapper entre otros capaces de realizar el mismo trabajo.

Los **software de diseño asistido por ordenador** están orientados a la creación y edición de objetos. A partir de la nube de puntos se puede crear una superficie pudiendo tomar diferentes estilos ya sea como curvas de nivel, modelo de elevaciones o modelo de la pendiente.

Por otro lado, los **software de Sistemas de Información Geográfica (SIG)** manipulan, analizan, gestionan y almacenan datos vinculados al espacio. Consiste

en relacionar información georeferenciada en formato digital y herramientas informáticas para su análisis con unos objetivos concretos. La cartografía es una de las disciplinas más utilizadas en los SIG ya que estos se representan en un espacio con un sistema de coordenadas obtenido a partir de un sistema de proyección. Los programas SIG son la herramienta necesaria para manejar la información geográfica, combinando información gráfica y alfanumérica. ArcGIS es uno de los softwares informáticos que se utiliza para dicho trabajo.

Existen dos formatos de representación de la información espacial en la estructura de almacenamiento de un SIG; el formato vectorial y el formato raster. El formato vectorial define un objeto gráfico a través de sus límites o fronteras con el exterior, mediante unos ejes de coordenadas. La información se representa por medio de segmentos orientados de rectas o vectores formando diferentes tipos de entidades como puntos, líneas o polígonos. Por otro lado, el formato raster consiste en la división del espacio en una red de celdas, generalmente cuadradas. Cada una de estas celdas representa una unidad de información que se denomina píxel que se asocian a un único valor de una variable determinada que hace referencia a un identificador.

La elección del tipo de formato a utilizar va a depender del tipo de estudio a realizar, al software de trabajo que se emplee y sobre todo al tipo de análisis que se quiere llevar a cabo.

2.5.7 Aplicación a la Cartografía

La cartografía es una técnica que interpreta, analiza y representa gráficamente parte o todo de la superficie. Hoy en día se ha incrementado la demanda y disponibilidad de los datos espaciales para su creación por lo que se hace

necesaria la obtención de datos a una escala de tiempo y espacio reducida. Los instrumentos utilizados para representar la cartografía han pasado del papel a la cartografía digital, propiciado por una mejora de la tecnología.

El dron o VANT se ha convertido en una herramienta de obtención de información muy útil y eficaz que ahorra tiempo y reduce los costos. Los datos espaciales adquiridos serán la base de los diversos procesos que servirán para elaborar la cartografía deseada.

Para el manejo de los datos y la elaboración de la cartografía se utilizan tres tipos de programas:

- Los programas orientados al **Diseño Asistido por Ordenador (CAD)**, que son herramientas de diseño capaces de generar dibujos 2D y modelados 3D, que se basan en entidades geométricas vectoriales como líneas, puntos, arcos y polígonos.
- Los programas de **Sistemas de Información Geográfica (SIG)**, permiten combinar y relacionar diferentes elementos georeferenciados en el espacio.
- Programas para **Teledetección** que además de captar imágenes aéreas georeferenciadas permiten recoger imágenes de diferentes bandas del espectro electromagnético. Dependiendo del procesamiento informático que se haga en cada una de las bandas espectrales se mostrarán unos elementos u otros.

Las herramientas básicas para la elaboración de la cartografía, son tres:

- La **fotogrametría** permite medir sobre fotografías con las que se puede determinar las propiedades geométricas de los objetos y las situaciones espaciales a partir de imágenes fotográficas. Si se trabaja con una foto se

puede obtener información en primera instancia de la geometría del objeto, es decir, información bidimensional. Si se trabaja con dos o más fotos, en la zona común a éstas (zona de solape), se podrá tener visión estereoscópica (información tridimensional).

- La **fotointerpretación** es otra herramienta muy útil para realizar la cartografía de un área, ya que permite determinar los elementos que intervienen en el terreno. Para ello es necesario realizar un trabajo de campo para tener claro cuáles son los objetos y elementos que se desean cartografiar, descartando aquellos que provocan confusión en el resultado final.
- La tecnología **GNSS** (Global Navigation Satellite System), cuyo sistema más conocido es el **GPS** (Global Positioning System) permite determinar las coordenadas de cualquier punto de la superficie terrestre con gran precisión. Este sistema tiene una importancia bastante significativa en lo que concierne a la cartografía, para poder localizar de una forma precisa los elementos que se pretenden digitalizar y no cometer errores en cuanto a la posición de estos en el espacio.

2.5.8 Aplicaciones Adicionales

La superficie creada, modificada o no, permite generar una cartografía que representa la realidad de una manera simplificada. Existen numerosas aplicaciones orientadas a diferentes disciplinas. Esta representación cartográfica irá orientada a la hidrografía, la vegetación, la topografía y la planimetría suponiendo el estudio exhaustivo de la población, las comunicaciones, las

actividades industriales, etc. El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) servirá de base para la realización de muchos mapas.

2.5.8.1 El Modelo Digital de Elevación (MDE) y su utilidad como modelo base.

Estos modelos se crean a partir de una nube de puntos generada y procesada en el software del procesamiento fotogramétrico, correspondiendo cada punto a unas coordenadas X, Y, Z. Luego se transfieren los datos a un programa de diseño asistido por ordenador (CAD) que es capaz de georeferenciar.

El Modelo Digital de Superficie (MDS) representa, mediante una capa ráster, el relieve de la superficie tal y como se encuentra teniendo en cuenta las infraestructuras, edificaciones, vegetación, etc. Mientras que el Modelo Digital del Terreno (MDT) solo representa la superficie del relieve sin contar con las actuaciones antrópicas. Por ello se debe de trabajar con la superficie y eliminar o modificar aquellos puntos en los que toman objetos como árboles, edificios, entre otros.

Existen tres maneras para representar estos modelos para simplificar información:

- Las **curvas de nivel** son líneas que unen puntos con la misma altura siendo los intervalos generalmente constantes.
- Las **redes irregulares de triangulación (TIN)**. Se crea a partir de la triangulación de un conjunto de vértices que forman una red de vectores conectados. Este método de representación ralentiza el proceso y no aporta mucho a la hora de analizar el terreno.

- Se puede representar con formato **raster**. Este formato es más cómodo ya que permite visualizar las diferentes altitudes en diferentes gamas de color.

Estos modelos, además de aportar la altitud de cada punto, contienen información que puede ser útil a la hora de analizar el terreno. Esta información se obtiene a partir del cálculo de diferentes variables a partir de procesamientos de álgebra de mapas, como puede ser la pendiente, la orientación, la curvatura, la rugosidad, la visibilidad o la dirección del flujo.

2.5.9 Resultados Finales

Los resultados se representan en Mapas y Planos en función de la escala a la que se representen, siendo los mapas una interpretación gráfica simplificada de la realidad. Ya se ha indicado que los formatos en los que se puede procesar la información son diversos, desde formato vectorial (puntos, líneas o polígonos), formato raster u ortoimágenes, todos en ellos en dos dimensiones e incluso se puede visualizar en tercera dimensión. Toda representación gráfica debe ir acompañada de escala, sistemas de coordenadas y leyenda de los elementos que aparecen en el área cartografiada.

2.6 POSICIÓN SOLAR⁸

El recorrido solar se puede estimar a través de gráficos geométricos, o cálculos analíticos, ya que la mecánica celeste se puede describir por ecuaciones de trigonometría espacial, es posible escenificar en gráficos la posición solar variable a lo largo del tiempo y para cada latitud con diferentes tipos de diagramas, normalmente se trabaja con unas fechas útiles y relevantes: los solsticios y equinoccios ellos reproducirán la banda de incidencia solar, un área clave para el aprovechamiento de la radiación.

Desde una ubicación fija en la superficie terrestre, el Sol parece moverse a lo largo del cielo. La posición del Sol depende de la ubicación de un punto de la Tierra, la hora del día y la época del año. Este movimiento aparente del Sol, causado por la rotación de la Tierra alrededor de su eje, cambia el ángulo en el que la luz llega al terreno y tiene un gran impacto en la cantidad de energía recibida por los módulos fotovoltaicos. La posición del Sol se puede definir por dos ángulos (ver figura 20):

- **Azimut:** Posición angular del Sol expresada en grados de 0 a 360 tomando como posición inicial el norte y medido en sentido horario.
- **Altitud o elevación:** Ángulo vertical formado entre el horizonte y el Sol cuyo valor oscila de 0 a 90 grados.

⁸ Sabady, P. R. (1989). *Arquitectura Solar: Concepto, Cálculo y Ejecución de Edificaciones Solares*. & Cusa, J. (1994). *Energía solar para viviendas*.

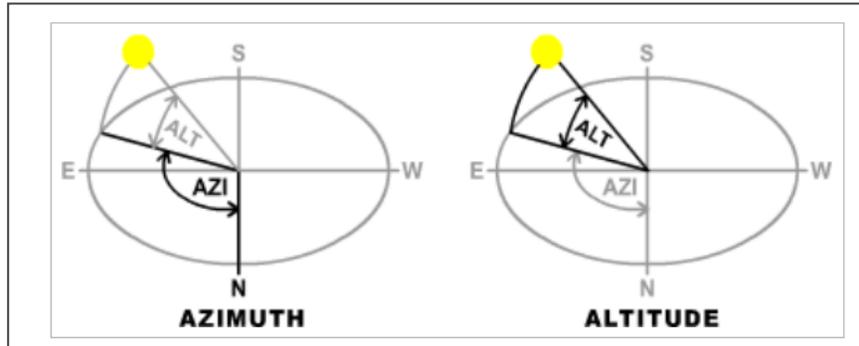


Figura 20. Posición del Sol que se da típicamente como un ángulo de Azimut y Altitud

Fuente: <http://wiki.naturalfrequency.com>, Ecotect Community. (2016)

Para obtener estos ángulos se acude a la carta solar cilíndrica (gráfico cartesiano) o la carta solar estereográfica (gráfico polar), la cual consiste en un diagrama en el que se representa la posición del Sol sobre un lugar determinado para fechas diferentes y a diferentes horas, en función de la altura del Sol y su azimut.

A continuación se demuestra en el diagrama (figura 21) la ruta del Sol durante un día, es decir cada cierta hora, mostrando el transcurrir de la sombra provocada por iluminación del Sol en una edificación.

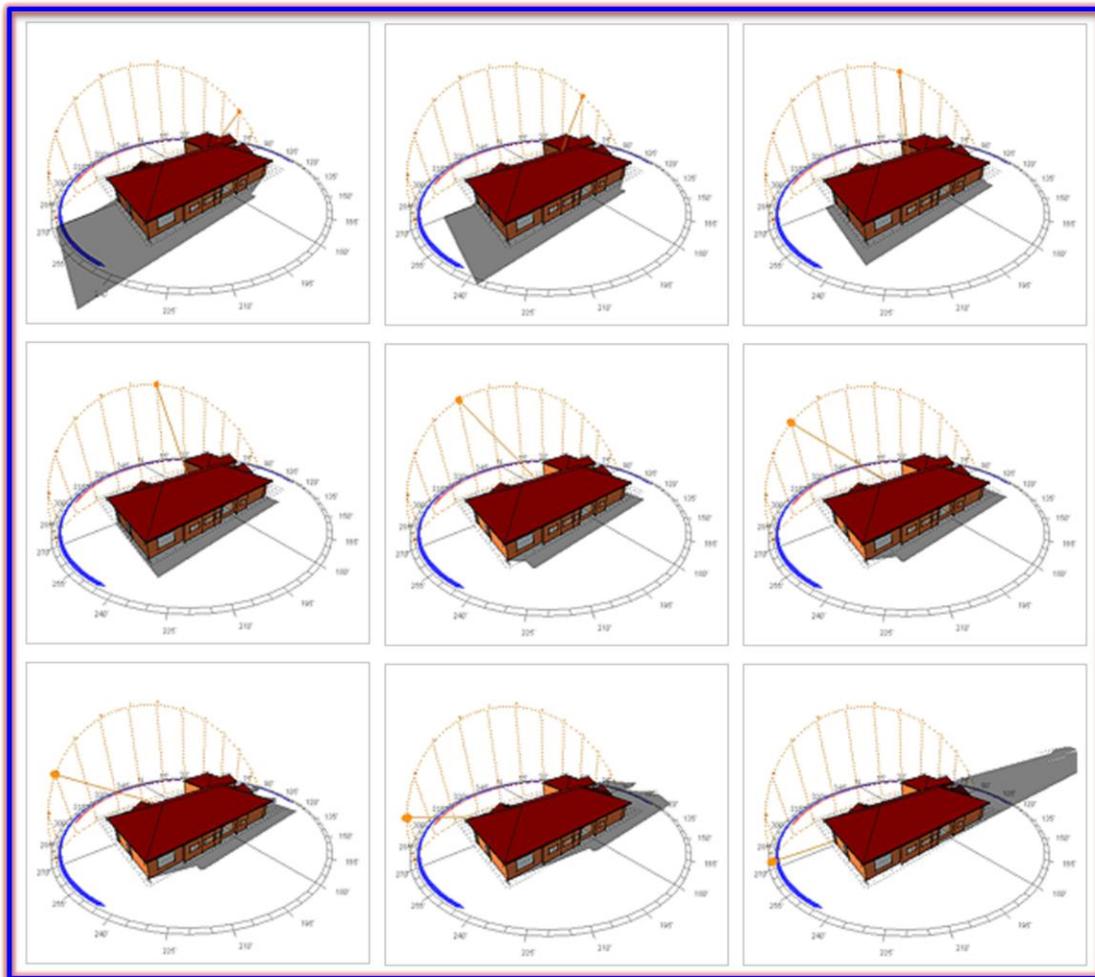


Figura 21. Ruta del Sol por hora (desde el Orto hasta el Ocaso)

Fuente: <http://wiki.naturalfrequency.com>, Ecotect Community. (2016)

En este otro diagrama (figura 22) se observa la ruta del Sol durante el año; su posición durante el mediodía del día 21 de cada mes, ruta hasta medio año, la cual se repite de forma inversa el resto del medio año. Se muestra la variación que existe de la sombra debido a la iluminación del Sol según el mes en una edificación.

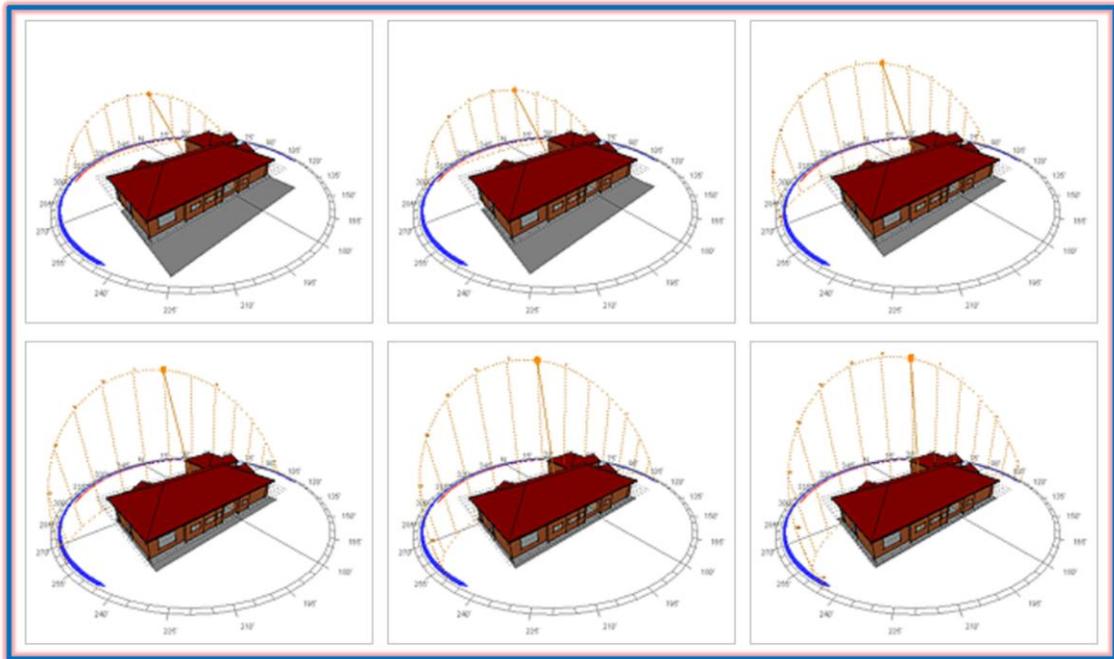


Figura 22. Ruta del Sol anual (día 21 de cada mes)

Fuente: <http://wiki.naturalfrequency.com>, Ecotect Community. (2016)

2.6.1 Movimiento de la Tierra⁹

El planeta tierra describe una órbita elíptica en su traslación alrededor del Sol e invierte 365 días en completar un ciclo llamado año.

La tierra idealizada como una esfera, gira en torno a una recta que lo atravesaría de Norte a Sur por su centro, podemos afirmar que este eje rotacional se mantiene constantemente inclinado $23^{\circ} 27'$ respecto del plano elíptico.

⁹ XVIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente (XVIII- SPES), Lima, 14 -19.11.2011. *Representación Gráfica de la Posición Solar y una Superficie dada para la ciudad de Cochabamba – Bolivia.*

Cualquier punto de la tierra se puede localizar por sus coordenadas globales, denominadas Latitud (φ) y Longitud (λ), correspondientes a su paralelo y meridiano respectivamente.

- **Latitud (φ):** se mide por su elevación en grados respecto al ecuador, considerando el polo norte como $\varphi = 90^\circ$ N. Se toman valores positivos para el hemisferio norte y negativos para el sur, son paralelos de referencia del hemisferio norte.
- **Longitud (λ):** es la distancia angular que forma el meridiano del lugar con el meridiano 0° de referencia que pasa por Greenwich (Londres). Se toman valores positivos hacia el este y negativos hacia el oeste.

2.6.2 Movimiento del Sol

Para el estudio del soleamiento en cualquier superficie es de interés suponer que el sol realiza su recorrido por una bóveda celeste, del cual somos el centro.

Los puntos singulares de la bóveda o hemisferio celeste serían el punto más alto o cenit, y el plano del horizonte con las orientaciones principales (N, S, E y W). Las coordenadas celestes permiten localizar cualquier punto del hemisferio por su Altura (A) o Elevación sobre el horizonte y su Azimut (Z) o desviación al este u oeste del Norte. Ello nos permite representar los astros en una esfera celeste de forma similar que se ubica una posición sobre una esfera terrestre.

2.6.2.1 Recorrido aparente del Sol

▪ Equinoccios:

Es el recorrido solar del 21 de Marzo y Septiembre de cada año, época en que los dos polos de la Tierra se encuentran a igual distancia del Sol cayendo la luz solar por igual en ambos hemisferios. Se caracteriza porque el Orto (Amanecer) coincide con el Este, a las 6:00 horas, y el Ocaso (puesta de sol) con el Oeste, a las 18:00 horas, con una duración total de 12 horas (equi-noccio = igual-noche).

- ✓ Para el Hemisferio Norte: 21 de Marzo será el Equinoccio de Primavera y el 21 de Septiembre será el Equinoccio de Otoño.
- ✓ Para el Hemisferio Sur: 21 de Marzo será el Equinoccio de Otoño y el 21 de Septiembre será el Equinoccio de Primavera.

La figura 23 que sigue hace referencia a la posición del Sol al mediodía en los Equinoccios (Primavera y otoño) correspondientes al Hemisferio Norte, el cual ocurre en la orientación Sur. Como sucede en Venezuela (latitud 10°N).

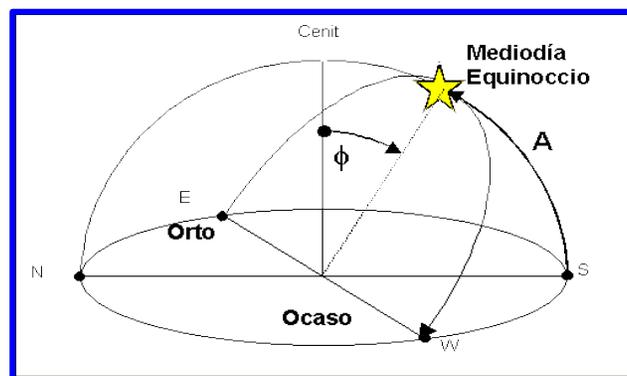


Figura 23. Equinoccio al mediodía. Hemisferio Norte

Fuente: <http://www.jocecycl.org/puzzle/ambiental>

- **Solsticios:**

Momentos del año en el que el Sol alcanza su mayor o menor altura aparente en el cielo, y la duración del día o de la noche son las máximas del año, respectivamente. Astronómicamente, los solsticios son los momentos en los que el Sol alcanza la máxima declinación norte ($+23^{\circ} 27'$) o sur ($-23^{\circ} 27'$) con respecto al ecuador terrestre.

El solsticio es un término astronómico relacionado con la posición del Sol en el ecuador celeste. El nombre proviene del latín solstitium (sol quieto).

- ✓ Para el Hemisferio Norte: El Solsticio de Verano ocurre el 21 de Junio y el Sol alcanza el cenit al mediodía sobre el Trópico de Cáncer. El Solsticio de Invierno ocurre el 21 de Diciembre, donde el Sol alcanza el cenit al mediodía sobre el Trópico de Capricornio.
- ✓ Para el Hemisferio Sur: El Solsticio de Invierno ocurre el 21 de Junio y el Sol alcanza el cenit al mediodía sobre el Trópico de Cáncer. El Solsticio de Verano ocurre el 21 de Diciembre, el Sol alcanza el cenit al mediodía sobre el Trópico de Capricornio.

La siguiente imagen hace referencia al Solsticio de Verano e Invierno del Hemisferio Norte, 21 de Junio y 21 de Diciembre respectivamente, donde el Sol recorre en la orientación Sur. Como sucede en Venezuela (latitud 10°N).

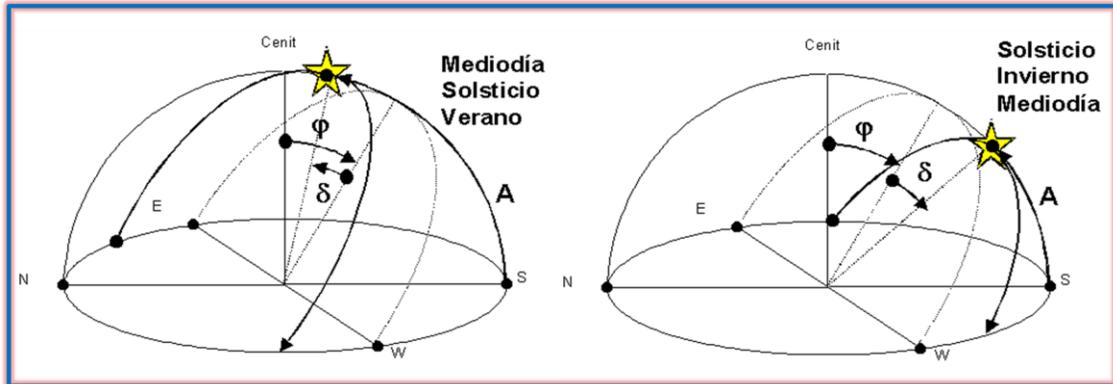


Figura 24. Solsticio de verano e invierno para el Hemisferio Norte

Fuente: <http://www.jocecyl.org/puzzle/ambiental>

En la imagen (figura 25) se muestra el movimiento de traslación de la Tierra alrededor del Sol, indicando Equinoccios y Solsticios según sea el Hemisferio (Norte o Sur) con el día y mes correspondientes a cada uno durante el año.

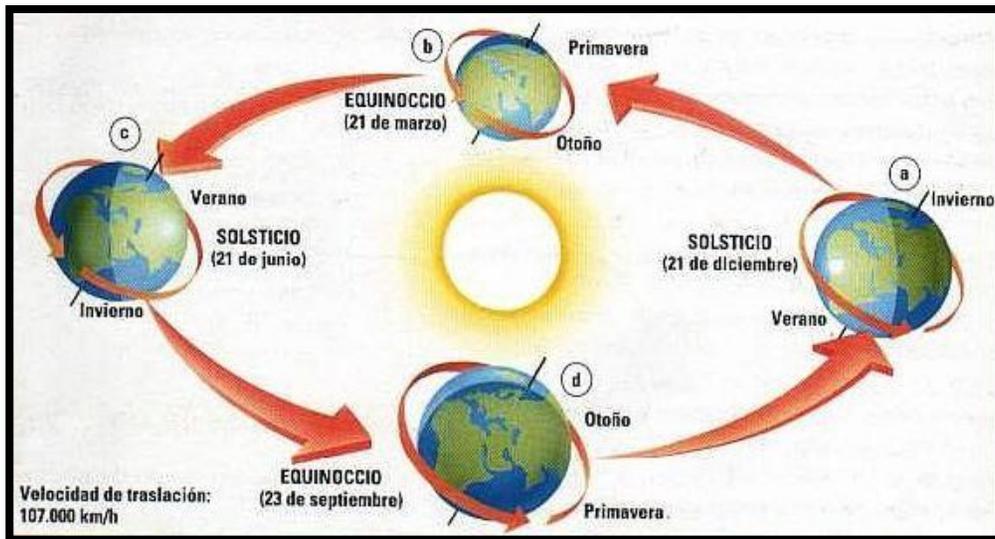


Figura 25. Movimiento de traslación de la Tierra

Fuente: Página de internet consultada:

<http://www.profesorenlinea.cl/imagengeografia/TierraMovimientos004.jpg>

2.6.3 Cartas Solares

Las cartas solares constituyen la representación gráfica de las trayectorias aparentes del sol en un punto de la superficie terrestre en función de la latitud. Su construcción se basa en la proyección cilíndrica o cónica de las trayectorias del Sol en la bóveda celeste sobre una superficie plana. Estas cartas representan las posiciones del sol en algunos días significativos del año como son sus solsticios y equinoccios, indicando las horas y pudiendo leer sus dos coordenadas, el ángulo de Altura o Elevación, es decir el ángulo que forma la visual al sol con el horizonte medido sobre plano vertical, y el Azimut, es decir el ángulo que forma la vertical que pasa por el sol, con el plano meridiano que se mide sobre el horizonte, siendo creciente hacia el Este o al Oeste partiendo del Norte.

Un modelo tradicional del recorrido solar sobre la hemiesfera celeste se puede realizar en sistema diédrico, aunque requiere operaciones de geometría descriptiva para su utilización, resulta ser la Carta Solar Estereográfica de Fisher-Mattioni (ver figura 26) que se basa en un sistema de coordenadas angulares donde el radio representa la Altura o Elevación Solar y los ángulos el Azimut que se mide desde el Sur (0°) al Norte (180°).

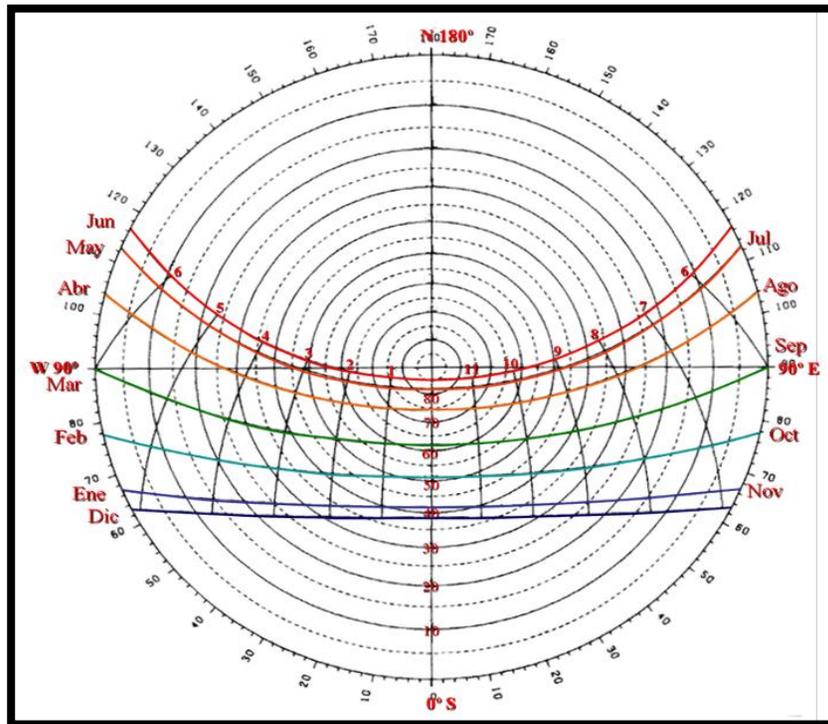


Figura 26. Carta Solar Estereográfica. Hemisferio Norte

Fuente: Instituto de Tecnologías Educativas. España

Sobre este sistema de coordenadas se representan los meses y las horas en función de la Altura Solar y el Azimut para una determinada latitud.

La intersección entre la curva de la fecha (día 21 de cada mes) y el punto de la hora solar real, nos indica la Altura Solar en los círculos concéntricos y el Azimut del orto y el ocaso en el borde de la carta.

Una variante muy interesante es la Carta Solar Cilíndrica (ver figura 27), muestra el recorrido aparente del sol en un cilindro alrededor del observador (proyección cilíndrica), que luego se despliega en el plano.

En este caso, el Azimut y la Altura solar se describen rectangularmente en la malla, en el eje de las abscisas se muestra la orientación angular horizontal, en la ordenada, la elevación angular.

En la práctica se utiliza una escala uniforme para la altura solar (0° a 90°), para evitar que el sol «se salga por arriba del cilindro».

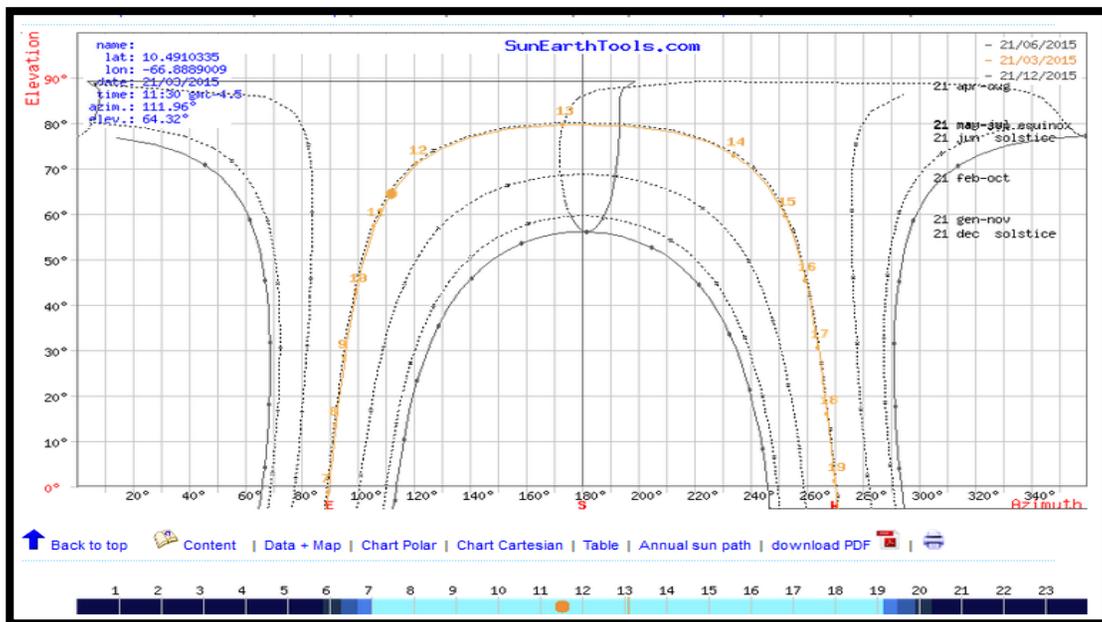


Figura 27. Carta Solar Cilíndrica en el Hemisferio Norte. Para la Ciudad Universitaria, Caracas - Venezuela

Fuente: Página web: sunearthtools.com

2.7 ENERGÍA SOLAR

La energía del Sol puede ser utilizada esencialmente de tres formas. Cuando se habla de energía Solar conviene establecer una diferencia entre:

I. Energía Fotovoltaica:

Tecnología que usa la energía del Sol para producir electricidad que alimenta aparatos eléctricos y alumbrado usando la luz del sol.

II. Solar térmica:

Tecnología que utilizan la energía del sol para proveer agua caliente o de calefacción para las casas y las piscinas o albercas.

III. Calor pasivo:

Se refiere al calor que recibimos en forma natural del sol. Este elemento puede estar considerado para reducir el uso de combustible para la calefacción.

2.7.1 La constante Solar

Es la densidad de la energía solar que alcanza la frontera externa de la atmósfera, su valor es comúnmente casi igual a 1360 w/m^2 (aún cuando puede cambiar cualquier porcentaje durante el año a causa de las ligeras variaciones de las distancias Tierra-Sol).

El watt por m^2 (w/m^2) es la unidad más empleada para cuantificar la radiación solar, es un flujo, una potencia por unidad de superficie $1 w/m^2$ es también igual a 1 Joule por segundo y por m^2 , por lo tanto $1 w = 1 j/s$, aquí la energía es electromagnética pero las unidades son las mismas que para la energía eléctrica.

2.7.2 Radiación Solar

El Sol como principal fuente de energía emite radiación, que consiste en despedir cualquier tipo de energía en forma de ondas electromagnéticas que se desplazan por el espacio en todas direcciones. Así, la Tierra recibe los efectos de las ondas térmicas emitidas por la fuente solar, cuando se encuentra en su camino.

Estas ondas electromagnéticas, referidas al sol como agente emisor, son los rayos solares, los cuales parten del punto de radiación para ser transmitidos, por un movimiento ondulatorio. Estas longitudes de ondas suelen ser distintas; su conjunto se denomina espectro electromagnético. El conjunto de las longitudes de onda emitidas por el Sol se denomina espectro solar.

2.7.2.1 Rayos Solares

La mitad de estos rayos aproximadamente son visibles, constituyendo la banda radiante visible, perceptibles por el ojo humano.

El resto de los rayos solares son invisibles. La mayoría están situados por encima de la banda visible: son los rayos infrarrojos o caloríficos, llamados así por su alto poder calórico, transmisores del calor. Tienen una longitud de onda relativamente grande y ofrecen fenómenos de difracción.

Los rayos por debajo de la banda visible, son pocos y reciben el nombre de rayos ultravioleta.

Existen otros tipos de radiación de frecuencia muy elevada; los más importantes son los llamados rayos cósmicos, de influencia biológica en los seres vivos.

La proporción de la radiación solar en las distintas regiones del espectro es aproximadamente:

- Ultravioleta: 7%
- Luz visible: 43%
- Infrarrojo: 49%
- El resto: 1%

2.7.2.2 La radiación climatológica

En función de cómo llega la radiación a los objetos situados en la superficie terrestre, se pueden clasificar en cinco tipos, los cuales son los siguientes:

2.7.2.2.1 Rayos solares directos

Son aquellos recibidos en una superficie perpendicular a la dirección de los rayos. La radiación directa es la que se denomina brillo del sol, porque ofrece una luz cegadora. Estos rayos permiten el más óptimo aprovechamiento para aplicaciones térmicas controladas.

2.7.2.2.2 Rayos difusos

Presentan una radiación más débil, aunque también sean térmicamente aprovechables. La radiación difusa es causada por la desviación de los rayos

debida a la acción de los agentes atmosféricos (nubes, polvo, gotas de agua, etc.), que producen una dispersión capaz de alterar, por interacción la radiación original. Este fenómeno es el que produce el color azulado del cielo.

2.7.2.2.3 Rayos cenitales

Son asimilables al componente vertical de la radiación difusa, es decir cuando la superficie receptora sea perpendicular a aquélla.

2.7.2.2.4 Rayos reflejados (albedo)

Se considera la radiación directa o difusa reflejada por la superficie de la tierra que incide sobre una superficie receptora plana.

2.7.2.2.5 Radiación Global

Corresponde a la suma de las radiaciones solares directa, difusa y reflejada. Su conocimiento es de suma importancia para efectuar el cálculo de la posible energía aprovechable en cada lugar.

2.7.3 Valoración de la radiación global

El valor exacto de la radiación global en un punto dado depende tanto de la intensidad de esta misma radiación, como de la insolación o soleamiento del lugar. Ambas condiciones se hallan en función de las condiciones atmosféricas del punto de la tierra en donde se estudia el fenómeno.

Dicho valor variará según sea la zona geográfica de la localidad objeto del problema: la latitud es un factor determinante. También lo son la altura sobre el nivel del mar; la estación del año; la hora; y la calidad atmosférica.

2.7.4 Comportamiento de la radiación solar

Lo que interesa conocer es la suma total de energía solar que se podrá recibir en un punto concreto durante determinado lapso de tiempo, para conocer de antemano la rentabilidad de la instalación. Este conocimiento requiere un estudio completo y detallado del lugar.

2.7.4.1 Intensidad de la radiación

La intensidad de la radiación depende de la posición de cada lugar con respecto a los rayos incidentes del sol, es decir, su situación geográfica. Esta intensidad se mide en w/m^2 o en $kCal/m^2$ por hora, para la obtención de los datos se utilizan unos aparatos registradores especialmente diseñados para cumplir tal misión, y cuyos dispositivos de medición deben orientarse adecuadamente.

En principio, se consideran como alturas normales medias, las situadas a menos de 400 msnm (metros sobre el nivel del mar). A partir de esa altura la intensidad de la radiación aumenta. Para efectuar los cálculos pertinentes, se toman como base los valores anuales medios en kw/m^2 .

2.7.5 Insolación

La insolación o soleamiento es el número de horas diarias que, en un punto determinado, está sometido a la radiación solar. Depende de su situación

geográfica, de las condiciones climatológicas y de la época del año en que se verifiquen las mediciones.

Los mayores valores de soleamiento no se dan en el ecuador, sino en las proximidades de las latitudes 40° N y 40° S, por encima y por debajo de ambos trópicos; el fenómeno se explica por la declinación solar consecuencia de la inclinación del eje de la Tierra.

En las zonas próximas a los trópicos, la trayectoria del sol es casi vertical a ellas, lo que supone que los días son más largos que en la zona ecuatorial. De esta forma, el aumento de la insolación equilibra, y aun supera, el hecho de que la intensidad radiada pueda ser menor.

2.7.5.1 Duración de la insolación

Depende de la posición geográfica y de las condiciones climáticas. Los valores máximos se alcanzan en las zonas desérticas o en alta montaña. La intensidad de la radiación y la duración anual de la insolación determinan las cantidades de energía de que dispondremos para una posición geográfica determinada.

Los meteorólogos distinguen diversos tipos de duración de la insolación, son los siguientes:

Duración de la insolación astronómicamente posible: Se obtiene a partir del número de horas de sol suponiendo el cielo sin nubes; el punto de referencia se encuentra en un plano libre de obstáculos, con un horizonte perfectamente horizontal. Por lo tanto, esta duración de la insolación sólo depende de la latitud geográfica del lugar.

Duración posible real de la insolación: Se determina a partir del número de horas de sol anuales en un cielo sin nubes y en terrenos cualesquiera. La diferencia con la duración astronómica es que no se limita al horizonte, si no que presenta montañas, vegetación, edificios, etc.

Duración efectiva de la insolación: Es igual al tiempo en que luce el sol. Además de las limitaciones con el horizonte, presencia de montañas, vegetación, edificios, etc., depende del grado de nubosidad del cielo.

Duración relativa de la insolación: Da la relación entre la insolación registrada realmente y la posible y se expresa en tantos por ciento. Independientemente de la latitud geográfica y de la limitación del horizonte, esta magnitud permite deducir el grado de beneficio solar que recibe un lugar y la comparación directa con otros puntos.

2.7.6 La Irradiación Solar (Energía Solar)

Es la cantidad total de energía solar acumulada sobre un área durante un cierto tiempo, este período de tiempo puede ser una hora, un día, un mes, un año. Se expresa comúnmente en unidades de watts-hora por metro cuadrado (wh/m^2) o kilowatts-hora por metro cuadrado (kwh/m^2). La irradiación solar cuantitativa y la producción de un arreglo en el tiempo, es la medición principal requerida para dimensionar y estimar el comportamiento de un sistema fotovoltaico.

Una gran irradiancia solar significa que la energía es acumulada rápido, lo cual da como resultado una gran irradiación solar (energía total).

Desde la superficie de la tierra, la irradiancia solar aparece con cambios durante el día, comienza en cero durante la noche y se incrementa a medida que sale el sol.

Su pico está alrededor del medio día y decrece con la puesta del sol. La irradiación es la energía total ganada durante un ciclo.

En la figura 28 se puede observar la radiación solar según los afecte los diversos componentes que conforman la atmósfera y así apreciar la irradiación en el entorno; a demás se tiene la explicación visual del concepto de irradiación solar.

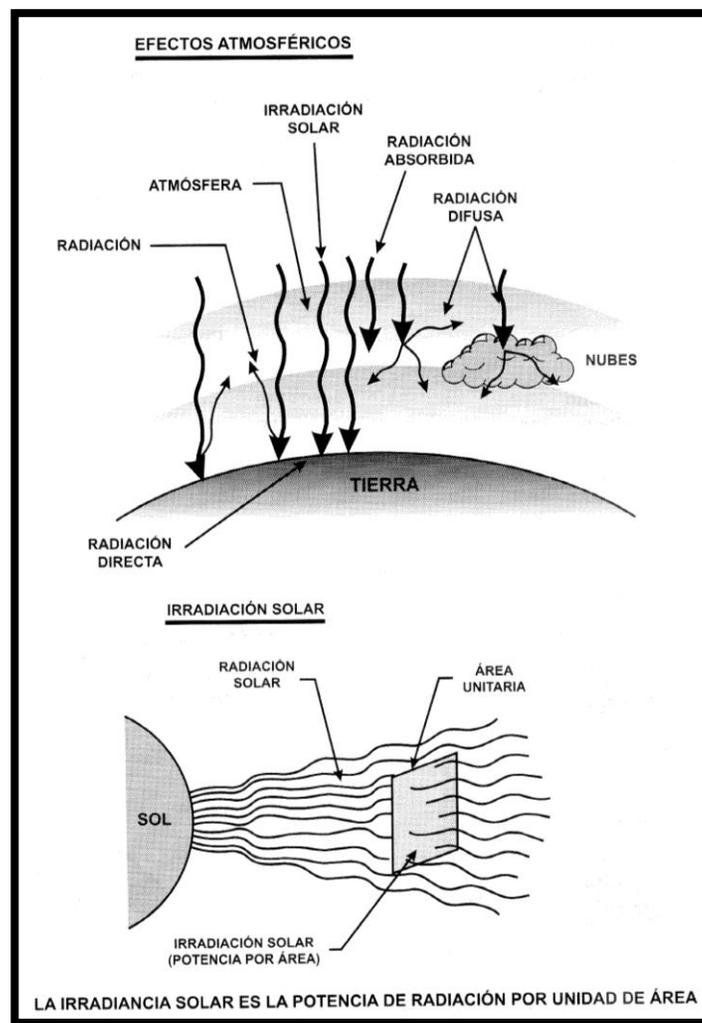


Figura 28. Tipos de Radiación Solar

Fuente: Instalaciones eléctricas domésticas convencionales y solares fotovoltaicas. Gilberto Enríquez Harper. México (2012)

2.7.6.1 Diferencia entre irradiación e irradiancia solar.

Dicho anteriormente, la irradiación solar significa la cantidad de energía solar en (kwh/m^2), acumulada sobre un área durante un tiempo determinado (horas, días, meses, años), para dimensionar y estimar el comportamiento de un sistema fotovoltaico. En cambio, la irradiancia solar es la potencia por unidad de área (kw/m^2) que varía durante el día, y se incrementa en la medida que sale el sol. Su máximo valor es alcanzado, cuando está alrededor del mediodía y decrece en el atardecer.

Si se grafica la irradiancia solar contra el tiempo, la irradiación solar es el área bajo la curva de la irradiancia, como se muestra en la figura siguiente.

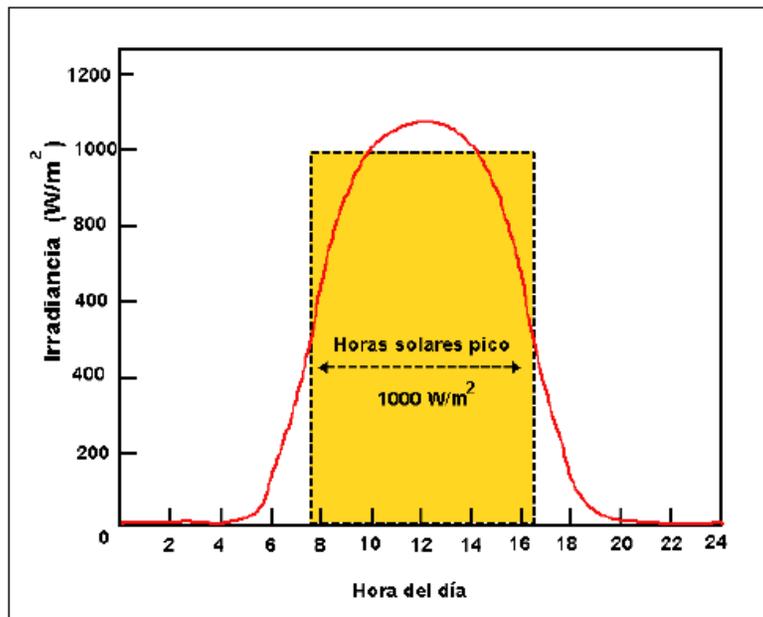


Figura 29. Irradiación Solar: área bajo la curva entre la irradiancia vs el tiempo

Fuente: Instalaciones eléctricas domésticas convencionales y solares fotovoltaicas. Gilberto Enríquez Harper. México (2012)

2.8 APROVECHAMIENTO ENERGÍA SOLAR¹⁰

En una energía pura y natural como la ofrecida por el sol, debe destacarse que:

- Se trata de una materia limpia y que no requiere costosos trabajos de extracción ni de transporte para llevarla al punto de conversión en energía consumible.
- No precisa almacenamiento, no ocupa espacios muertos, está en continuo movimiento atravesando la atmósfera.
- Su transformación en energía mecánica, eléctrica, química, etc., no produce ningún tipo de desperdicios, ni contamina el ambiente.
- No se corre el riesgo de agotarse a corto o mediano plazo.
- No precisa mantenimiento ni cuidados especiales.

Para la debida utilización de la radiación solar, lo primero que debe hacerse es captar la energía procedente del sol que llega a un punto determinado, y conducirla adecuadamente transformada, al lugar donde será consumida.

El aprovechamiento de la energía solar por parte de la ingeniería, sea para calefacción o para producción de energía eléctrica, suele requerir el empleo de elementos constructivos específicos.

Los más importantes son los colectores solares y los sistemas acumuladores de calor, así como las distintas estructuras de cubierta energética.

¹⁰ Cusa, J. (1994). *Energía solar para viviendas*; Enríquez Harper, G. (2012). *Instalaciones Eléctricas Domésticas Convencionales y Solares Fotovoltaica*; Sabady, P. R. (1989). *Arquitectura Solar: Concepto, Cálculo y Ejecución de Edificaciones Solares*, & Szokolay, S. V. (1978). *Energía Solar y Edificación*.

2.8.1 Los colectores solares

Se denomina colector solar a cualquier forma de superficie que sirva para aprovechar la energía de las radiaciones solares con fines térmicos o eléctricos. Según las posibilidades de aprovechamiento, hay que distinguir entre colectores heliotérmicos, que producen calor, y colectores heliovoltaicos, que sirven para la producción de corriente eléctrica. Existen también colectores híbridos capaces de producir al mismo tiempo calor y energía eléctrica.

2.8.1.1 Colectores Heliotérmicos

El fundamento del equipo solar consiste en el aprovechamiento del calor que genera la radiación del sol, haciendo que se proyecte y acumule sobre un medio de receptabilidad, el cual se encargará de transportarla hasta donde convenga. Estos colectores producen calor para necesidades de una vivienda; calentar el agua y calentar el medio ambiente, ese calor será dirigido hacia las superficies interiores del edificio para que atempere el aire que contiene la casa, calentar el agua que se utiliza para atender las necesidades higiénicas del hogar. Estos pueden tener formas muy distintas según su construcción y sus aplicaciones. Se distinguen entre colectores concentradores de alta temperatura, colectores planos de temperatura media con protección de vidrio y colectores de baja temperatura sin protección de vidrio. Como medio de transporte del calor suele elegirse entre el agua, el aceite, un líquido especial o el aire.

2.8.1.2 Colectores Heliovoltaicos

Son llamados también generadores fotovoltaicos y baterías solares, su concepción y disposición es parecida a los colectores convertidores de la energía luminosa en calor, pero especialmente realizados para que transformen directamente dicha energía solar en electricidad. El sistema se basa en el aprovechamiento de determinadas propiedades que tienen los materiales con los que se han construido. Por este motivo, la energía eléctrica que se obtiene se conoce como fotovoltaica.

Un colector heliovoltaico está compuesto principalmente por un cierto número de células fotovoltaicas conectadas entre sí. El nombre de células fotovoltaicas es la denominación comercial de los elementos encargados de realizar la transformación de energía, técnicamente fotocélulas.

2.8.2 Sistemas de Energía Solar Fotovoltaicas

La energía solar fotovoltaica (FV) es una tecnología basada en el aprovechamiento de la energía solar, su funcionamiento es la conversión de la luz solar en energía eléctrica. Esta transformación se lleva a cabo mediante células o celdas solares que están fabricadas con material semiconductores, como el silicio, que generan electricidad cuando inciden sobre ellos la radiación solar.

En la decisión sobre el alcance de un proyecto solar a base de celdas fotovoltaicas (FV) se basa en la información sobre la radiación explotable, por lo que es necesario tener información de los sitios, obtenidas por las estaciones meteorológicas por datos estadísticos de al menos 10 años en los mapas o atlas de radiación solar.

2.8.2.1 Antecedentes

El primer uso real de las celdas fotovoltaicas (FV) data de finales de los 1950's y a través de los 1960's fue para los satélites orbitando. En los años 1970's, debido en los avances de la fabricación, se mejoró el comportamiento y calidad de los módulos fotovoltaicos; el costo se ha reducido de forma considerable y esto ha dado como resultado su aplicación en forma terrestre en instalaciones remotas. Estas aplicaciones incluyen carga de baterías para navegación, señalización, equipos de telecomunicaciones y otras aplicaciones típicas de baja potencia.

En forma subsecuente, las celdas fotovoltaicas encontraron aplicaciones como fuente de potencias para dispositivos electrónicos de bajo consumo, incluyendo calculadoras, relojes, radios, lámparas, entre otras.

Alrededor del mismo tiempo, la crisis de energía empujó a la necesidad del desarrollo de sistemas de potencia fotovoltaicos para aplicaciones residenciales y comerciales.

Actualmente, la producción de sistemas fotovoltaicos está creciendo a una tasa de 25% por año, esto ha traído como resultado una considerable reducción en los costos, acelerando su uso en casas y edificios, así como para la interconexión a la red eléctrica. En las gráficas que siguen (figura 30) indican la variación en la producción anual a nivel mundial y reducción en costos, que se menciona.

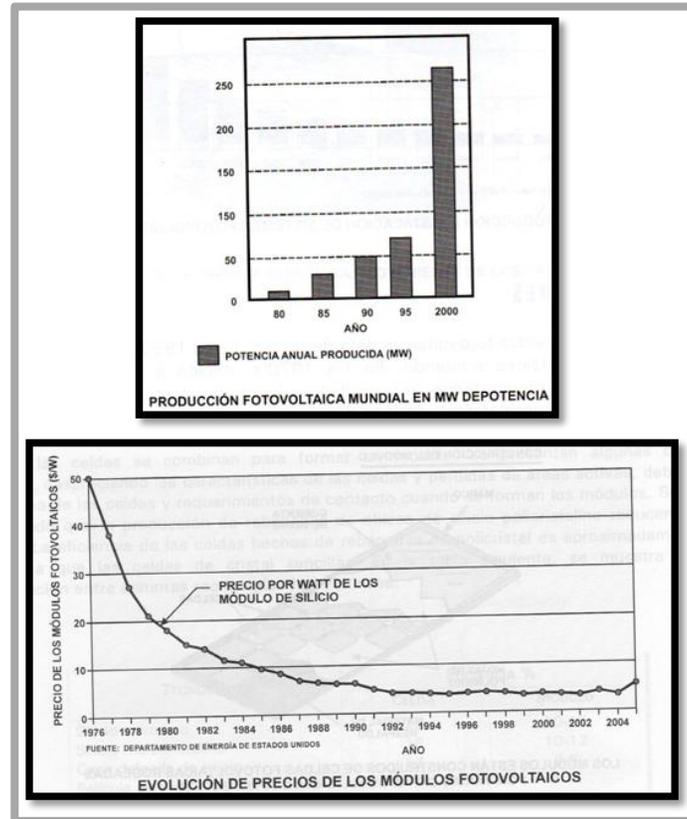


Figura 30. Variación en la producción y reducción de costos de los sistemas fotovoltaicos anualmente a nivel mundial

Fuente: Instalaciones eléctricas domésticas convencionales y solares fotovoltaicas. Gilberto Enríquez Harper. México (2012)

A continuación en la figura 31 se puede visualizar las aplicaciones del sistema fotovoltaico en la actualidad. Tanto para luminarias, electrodomésticos en corriente directa y corriente alterna, como en la atemperación del agua correspondiente al uso doméstico en las viviendas.

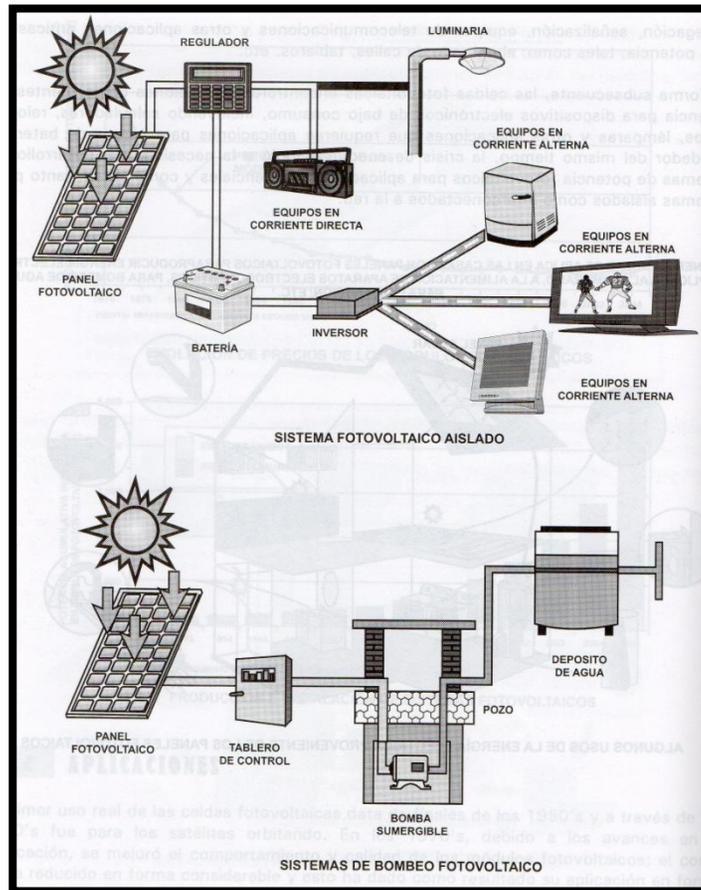


Figura 31. Aplicaciones del sistema fotovoltaico

Fuente: Instalaciones eléctricas domésticas convencionales y solares fotovoltaicas.

Gilberto Enríquez Harper. México (2012)

2.8.2.2 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Es importante definir que el sistema puede generar energía dependiendo del período de consumo (continuo o diurno). Estos se dividen principalmente en tres grandes grupos: sistemas fotovoltaicos aislados, conectados a la red y sistemas híbridos.

2.8.2.2.1 Sistemas Aislados

Debe abastecer la demanda tanto en el día como en la noche, por lo tanto, es necesario el sistema de almacenamiento. Este tipo de sistemas son independientes del sistema eléctrico tradicional y puede emplearse en locaciones aisladas donde no sea posible conectarse a la red eléctrica.

Al poseer un sistema fotovoltaico aislado se debe tener la conciencia que el consumo energético que realicen será el que su reserva energética les permita, lo cual hace necesario un adecuado dimensionamiento del sistema de almacenaje, como lo es el regulador y el banco de baterías.

2.8.2.2.2 Sistemas conectados a la red

Abastece solamente el consumo durante las horas del día, donde los paneles reciben radiación solar, por lo que no es necesario el bloque de almacenamiento en el sistema fotovoltaico. Estos sistemas no pueden trabajar independientes del sistema eléctrico tradicional; deben estar conectados a la red eléctrica para cubrir la demanda en los momentos en que los paneles no estén generando electricidad (En la noche o cuando la generación solar no sea suficiente para cubrir los picos de demanda).

Sin embargo, podría producirse durante el día más energía de la que se consume, en estos casos el excedente de energía se vierte a la red, para ello se debe tener un medidor de entrada, para medir la energía tomada de la red eléctrica y un medidor de salida, para medir la energía que se vierte a la red.

2.8.2.2.3 Sistemas conectados a la red con respaldo

Estos sistemas están conectados a la red eléctrica a demás de un sistema de almacenamiento; ya que en ocasiones la red de energía eléctrica sufre problemas de calidad de suministro, como consecuencia de la capacidad limitada que pudiera presentar las líneas de transmisión en relación de la demanda necesaria a satisfacer el consumo requerido por la carga. Una alternativa para solucionar este tipo de inconveniente es inyectar energía en los puntos problemáticos de la red eléctrica.

El objetivo de este tipo de sistema es que la energía eléctrica sea suministrada por los módulos fotovoltaicos en el día y durante la noche por la energía almacenada, cuando el consumo eléctrico es alto. Esta energía almacenada puede ser recargada desde el arreglo fotovoltaico durante el día o desde la red de energía eléctrica cuando la demanda sea pequeña, de esta manera la carga a la red se reduce en las horas de mayor consumo de energía haciendo el sistema fotovoltaico más confiable.

2.8.2.2.4 Sistemas Híbridos

Los sistemas híbridos generalmente están compuestos por un sistema de respaldo de energía, un generador convencional o la red eléctrica, acoplado de manera eficiente con una fuente de energía renovable, generalmente un sistema fotovoltaico, turbinas de generación eólica, pequeñas, entre otros; de modo de garantizar el suministro de la demanda de energía requerida.

Los sistemas híbridos se diseñan de manera que cuando la demanda de energía requerida no pueda ser suministrada por el arreglo fotovoltaico y el sistema de

almacenamiento entonces el sistema secundario de energía o de respaldo (generador convencional, un sistema de energía renovable o la red eléctrica) entra en funcionamiento a fin de garantizar el suministro de energía demandada por el sistema.

Dichos sistemas son necesarios cuando se requiera una disponibilidad constante y permanente de energía eléctrica, o bien cuando se requiere de elevadas cantidades de energía eléctrica. La ventaja es que hará que el sistema sea más eficiente pudiéndose reducir los costos de la inversión inicial. Se pueden utilizar a nivel industrial e incluso para un conjunto urbano de residencias.

2.8.2.3 Componentes de los sistemas fotovoltaicos

La componente primaria común a todos los sistemas fotovoltaicos es el arreglo fotovoltaico, que consiste de módulos fotovoltaicos individuales que están eléctricamente conectados para producir la potencia eléctrica de salida requerida.

Las celdas fotovoltaicas se conectan eléctricamente en circuitos serie y/o paralelo para producir mayores niveles de potencia. Los módulos fotovoltaicos consisten de circuitos de celdas fotovoltaicas selladas en un block laminado y protegido contra efectos ambientales. Los paneles fotovoltaicos incluyen uno o más módulos fotovoltaicos ensamblados como una unidad independiente. En fin, un arreglo fotovoltaico es la unidad generadora completa que consiste en cualquier número de módulos y paneles fotovoltaicos.

En las figuras que siguen a continuación se muestran: a) La fabricación de las celdas fotovoltaicas; b) Construcción del módulo; y c) Componentes principales de los sistemas fotovoltaicos.

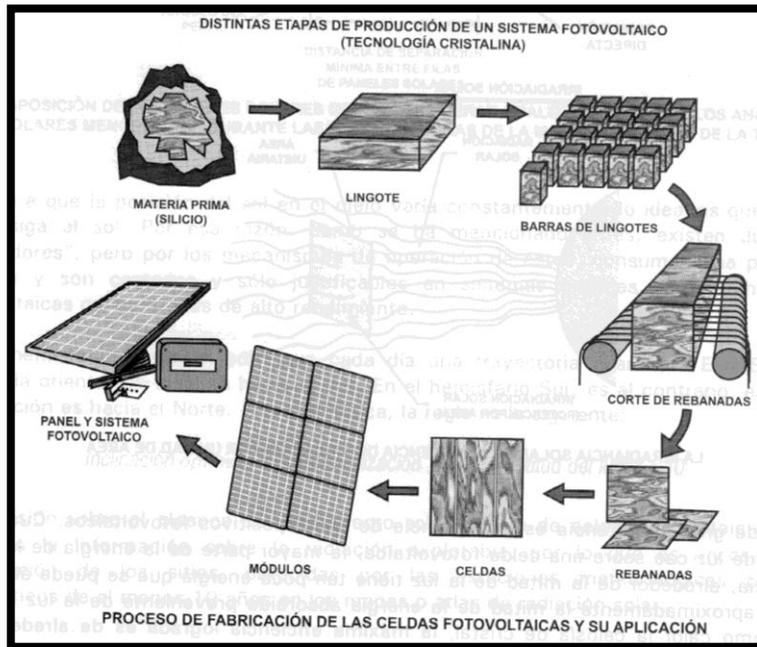


Figura 32. A) Proceso de fabricación de las celdas fotovoltaicas y su aplicación

Fuente: Instalaciones eléctricas domésticas convencionales y solares fotovoltaicas. Gilberto Enríquez Harper. México (2012)

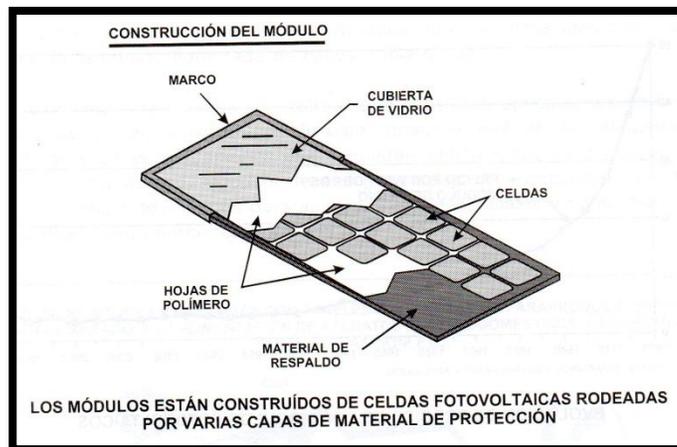


Figura 33. B) Partes que conforman el módulo fotovoltaico

Fuente: Instalaciones eléctricas domésticas convencionales y solares fotovoltaicas. Gilberto Enríquez Harper. México (2012)

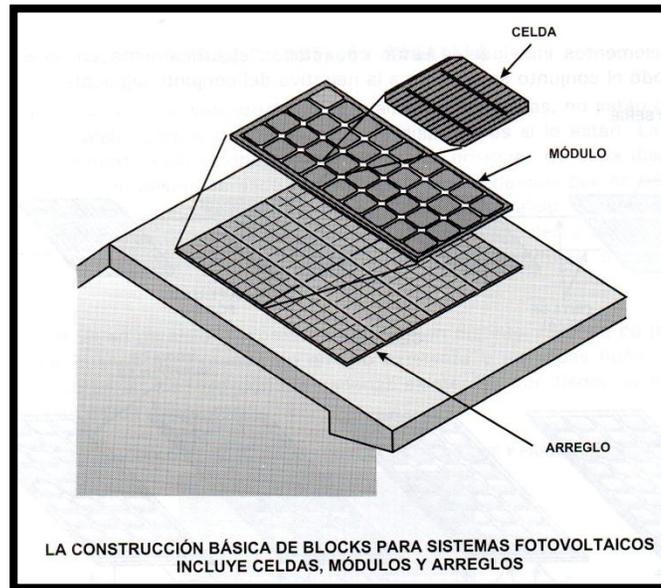


Figura 34. C) Componentes del Sistema Fotovoltaico (celda, módulo, arreglo)

Fuente: Instalaciones eléctricas domésticas convencionales y solares fotovoltaicas. Gilberto Enríquez Harper. México (2012)

Los componentes de los sistemas fotovoltaicos incluyen equipo para conducir, controlar, convertir, distribuir, almacenar y utilizar la energía producida por el arreglo. Las componentes específicas dependen de los requerimientos funcional y operacional del sistema.

Todos los componentes, a demás de los módulos fotovoltaicos o paneles, se conocen como el equilibrio del sistema. Los requerimiento dependen de la función del sistema fotovoltaico y también si el sistema va a operar aislado o conectado a la red.

Debido a que los sistemas fotovoltaicos puedan coleccionar energía durante el día, para almacenar energía se requiere de baterías, y debido a que éstas deben ser cargadas y descargadas en una cierta forma, se requieren entonces reguladores

cargadores de baterías. También se requerirá de inversores para convertir la corriente directa (CD) proveniente del módulo fotovoltaico y las baterías en corriente alterna (CA). Los fusibles o interruptores son parte esencial del sistema para su protección. A demás de esto, algunos de otros tipos de fuentes de potencia tales como los generadores se usan frecuentemente como respaldo. Otros componentes son los tableros, el alambrado y las interconexiones.

En resumen, algunas de las siguientes componentes se pueden usar en los sistemas fotovoltaicos:

- Celdas fotovoltaicas (en la forma de módulos y arreglos fotovoltaicos)
- Soportes fijos o con sistemas de seguimiento.
- Baterías de almacenamiento.
- Inversores.
- Reguladores o controladores para cargadores de baterías.
- Grupos de generadores.
- Fusibles o interruptores.
- Alambres y componentes de interconexión.
- Componentes mecánicas para el montaje del sistema.
- Sistemas de monitoreo.

2.8.2.4 Tecnología Fotovoltaica

2.8.2.4.1 *La célula solar*

Las células solares o las celdas fotovoltaicas son dos términos equivalentes para designar a los captadores de pequeño tamaño que se pueden utilizar como tales o bien, ensamblados en paneles solares o módulos fotovoltaicos (términos equivalentes cuando se habla de energía solar eléctrica y son generadores de corriente directa.)

Cada unidad es una plaquita muy delgada de silicio (de 0,4 a 0,5 mm de espesor como máximo) y de 80 a 120 mm de diámetro, de forma redonda o cuadrada. El silicio es un metaloide extraído de la sílice que transforma la luz solar directamente en energía eléctrica, con un rendimiento que inicialmente apenas llegaba al 4% en las primeras unidades que se fabricaron en serie, pero que en los modernos modelos de silicio cristalino ya alcanzan el 18% al 20%.

Los rayos de sol que inciden sobre las superficies de las células fotovoltaicas dan origen a migraciones de electrones sobre los diferentes átomos, fenómeno que da origen a la formación de una corriente eléctrica, la cual puede ser aprovechada de inmediato, consumida por un aparato eléctrico en conexión, o bien llevarse como carga a un acumulador. Al silicio se le agrega boro y arsénico para incrementar el rendimiento.

Cada celda puede suministrar una tensión de 0,5 Voltios a 18 mA/cm^2 . Tienen una duración prácticamente ilimitada, sin consumo ni desgaste, y requieren poco o nulo mantenimiento.

2.8.2.4.2 Módulos Fotovoltaicos

Si se conectan las celdas fotovoltaicas en serie o paralelo aumentará la potencia disponible, se suministran agrupadas en paneles solares o módulos fotovoltaicos.

Por lo general, estos contienen 34 o 36 unidades monocristalinas o policristalinas de silicio, conectadas en serie entre sí. Las celdas son cuidadosamente seleccionadas y de característica eléctrica homogéneas, formando casi siempre cuatro hileras doblemente interconectadas, para reducir al máximo la presentación de posibles fallos eléctricos.

Los módulos se fabrican mediante técnicas de laminación; las celdas son encapsuladas con un polímero resistente a los rayos ultravioletas (caucho de silicona) y montadas tras una superficie de vidrio especial templado de alta transmisión lumínica, que reducirá al mínimo las pérdidas por absorción. Este tipo de vidrio protector proporciona al conjunto una superficie deslizante a los desechos ambientales, soporta cambios bruscos climatológicos y es de alta resistencia a las roturas a efectos que pudiesen producir tormentas de arena, granizo y pedrisco.

La cara posterior de los módulos está formada por un material resistente a condiciones climatológicas más adversas; plancha de aluminio anodizado o una fina lámina impermeable de aluminio y un plástico flexible reflectante. El conjunto se rodea por un marco ligero de aluminio anodizado y se sella con una junta de silicona, con lo que se consigue una estructura robusta y resistente.

A continuación se puede apreciar una tabla que muestra los tipos de módulos fotovoltaicos existentes más comunes en el mercado, con la eficiencia típica del módulo y la máxima que se ha registrado, más la potencia pico (Wp) máxima que puede generar los módulos fotovoltaicos por m².

Tabla 4. Tipos de Módulos Fotovoltaicos según su eficiencia

Tipos de módulo fotovoltaico		Símbolo	Característica	Eficiencia típica del módulo (comerciales)	Eficiencia máxima registrada	Potencia pico máxima aprox.
Cristal de Silicio	Si-monocristalino	sc-Si	Tipo oblea	12% - 16%	16%	300 Wp
	Si-multicristalino	ms-Si	Tipo oblea	11% - 15%	15%	300 Wp
Lámina Delgada	Cobre/Indio/Seleniuro	CIS	Película delgada	8% - 11%	12%	100 Wp
	Telurio/Cadmio	TeCd	Película delgada	7% - 10%	10,50%	85 Wp
	Silicio amorfo	a-Si	Película delgada	5% - 7%	6%	128 Wp

Fuente: Elaboración propia.

2.8.2.4.3 Tipos de soportes

Son sistemas que forman parte de los elementos constructivos para la producción de energía eléctrica, según su tipo emplean elementos seguidores del movimiento del sol que favorezcan e incrementen la captación solar. Existen tres tipos de soportes para los colectores solares:

- **Colocación sobre soporte estático.**

Se refiere a un soporte sencillo sin movimiento, normalmente se realiza un estudio previo para saber su ubicación fija durante el año, los cuales incluyen orientación e inclinación, es el sistema más común en las instalaciones.

- **Sistema de seguimiento solar de un eje.**

Estos soportes tienen capacidad para hacer un cierto seguimiento solar, la rotación del soporte se hace por medio de un sólo eje, ya sea horizontal, vertical u oblicuo. El tipo de seguimiento es sencillo y relativamente económico, pero

limitado, ya que sólo puede seguir a la inclinación o azimut del sol, pero no a ambos simultáneamente.

- **Sistemas de seguimiento solar de dos ejes.**

Con este sistema se puede hacer un seguimiento total del sol en altitud y azimut con lo que se consigue que la radiación solar siempre incida en forma perpendicular, obteniendo de esta forma la mayor captación posible. Los sistemas básicos de regulación del seguimiento del sol por dos ejes son los siguientes:

- ✓ Sistemas mecánicos. El seguimiento se realiza por medio de un motor y un sistema de engranes que se ajustan de acuerdo a las variaciones de la inclinación del sol durante el año.
- ✓ Con dispositivo de ajuste automático. El ajuste se hace por medio de sensores que detentan cuando la radiación no incide en forma perpendicular al panel fotovoltaico, consiguiéndose la posición por medio de motores.
- ✓ Dispositivo sin motor. En estos sistemas, por medio de la dilatación de ciertos gases; la evaporación y equilibrio entre éstos permite un seguimiento del sol.

Con estos sistemas se estima un aumento entre el 30% y 40% de la captación solar.

CAPITULO III. METODOLOGÍA

El principal propósito de esta metodología es desarrollar un modelo con ArcGis que permita evaluar la localización óptima de instalaciones fotovoltaicas y la producción de energía eléctrica en una zona urbana. Aunque se pueden situar los paneles fotovoltaicos tanto en los techos como en las fachadas de los edificios, en este trabajo sólo se va a analizar la posibilidad de instalaciones en los techos.

El procedimiento se realizará utilizando un programa llamado ArcGis 10.1 de ESRI, basándose en un modelo tridimensional de la zona el cual fue generado a partir de imágenes digitales tomadas mediante un Dron (vehículo aéreo no tripulado).

Con estas imágenes se realiza una serie de correcciones junto con un proceso de gabinete explicado anteriormente, obteniendo nuestro material base a utilizar que es un modelo digital de superficie (MDS) de la zona urbana; en este caso se escogió La Ciudad Universitaria, UCV, Caracas – Venezuela. Este tipo de dato ha sido la base de diferentes trabajos anteriores como es el presentado por la revista de ESRI (Chaves y Bahill, 2010); debido a que permite utilizar tanto la superficie del terreno como la forma de los edificios y los árboles. A partir de este modelo se pretende determinar la superficie de techos, evaluar la radiación solar y posteriormente la potencia instalada y la energía.

Para el cálculo de la superficie disponible de los techos donde se ubicarán los paneles fotovoltaicos, hay que establecer los criterios que determinan cuales son las localizaciones adecuadas, que vienen siendo los factores que afectan el rendimiento de un panel fotovoltaico, accesos y áreas permitidas, para la elaboración del mapa, logrando obtener una mayor precisión de los resultados; en este trabajo se toma en consideración criterios que evalúen la pendiente y

orientación, sin descartar el efecto de las sombras; como se plantea en el trabajo de (Chaves y Bahill, 2010).

Para definir nuestros criterios, primero estudiamos aquellos factores que afectan el rendimiento de un panel fotovoltaico, estos incluyen:

- Energía de luz incidente.
- Reflexión.
- Efecto de la sombra.
- Efecto de la inclinación y orientación.
- Efecto de la temperatura.

A demás de otros criterios que se consideran importantes:

- Presencia de monumentos y edificios singulares.
- Superficie de los techos destinada al acceso del arreglo fotovoltaico.

Se establecen qué criterios nos serán útiles para llevar a cabo el análisis y obtener una solución posible, luego se definen dichos criterios indicando qué alternativas son válidas o aceptables y cuáles no lo son. La determinación de la superficie de techos se llevará a cabo mediante un análisis multicriterio booleano con las características que deben cumplir en cada emplazamiento, aplicando así una lógica borrosa.

La evaluación multicriterio, puede definirse como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de tomas de decisiones (Barredo, Gómez 2005).

Las técnicas multicriterio nos proveen de herramientas que permiten el análisis de las propiedades entre las alternativas de selección que se proponen, siendo capaces de obtener un análisis equilibrado de todos los factores asociados a un

problema de planificación, ya que permite la consideración de efectos intangibles como pueden ser las de carácter ambiental que nos ocupan.

Éstas técnicas se basan en la ponderación y compensación de variables que van a influir de manera positiva (aptitud) o negativa (impacto) sobre la actividad objeto de decisión y que deben ser enumeradas y catalogadas previamente.

Básicamente se determinan los criterios (variables) que se utilizan para realizar el análisis y conseguir la solución posible al problema, éstos se definen como los distintos aspectos de la realidad que inciden de alguna manera en las ventajas o inconvenientes de las alternativas disponibles como soluciones, a su vez pueden ser restricciones, en ésta técnica es recomendable la utilización de capas binarias para su evaluación.

En nuestro caso el uso de esta técnica nos permitirá obtener mapas de criterios que serán transformados en unidades comparables que expresarán el grado de aptitud de ciertas áreas en techos para obtener así su área potencial en la colocación de arreglos fotovoltaicos.

Dichos mapas asignan un valor a cada objeto (polígono, píxel, ubicación) en la capa. Esta normalización puede llevarse a cabo mediante un ajuste lineal en el cual se reescalen los valores originales el cual nos será útil para procesar la información con zonas de transición gradual, en fin es usar funciones de pertenencia borrosa (generalización del álgebra booleana) para generar mapas evaluables de cada criterio.

Las herramientas disponibles en ArcGis 10.1 relacionadas con la implementación de lógica borrosa para la superposición de raster las podemos encontrar en el módulo «Spatyal Analyst» caja de herramientas «Overlay», éstas se muestran a continuación en la figura que sigue.



Figura 35. Conjunto de herramientas disponibles para superposición de rasters en ArcGis

10.1

Fuente: Captura de pantalla desde ArcMap.

Con respecto a la estimación de la radiación solar existe la posibilidad de utilizar bases de datos climáticos existentes como:

- Los datos que se consultaron de la página de la NASA.
- Los datos geográficos correspondientes a la Ciudad Universitaria de Caracas, suministrados por el departamento de Hidrometrología de la U.C.V. , estos son:

Latitud: 10° 29' 44" N

Longitud: 66° 53' 12" W

Conocidos los datos geográficos de la Ciudad Universitaria de Caracas, se muestra a continuación en la tabla 5 los datos correspondientes al promedio mensual de radiación global para una superficie plana durante los últimos 22 años.

Tabla 5. Promedio mensual radiación global (kWh/m²) durante 22 años

Ubicación Geográfica	Latitud 10,483						Longitud 66,883					
Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Promedio mensual (22 años) kwh/m ²	6,38	6,17	6,17	5,12	4,75	4,87	5,34	5,33	5,32	5,19	5,37	5,77

Fuente: Elaboración Propia.

En este trabajo se utilizará como dato importante para la ponderación en ciertos procedimientos de cálculos que determinará una capa más precisa, la cual servirá posteriormente como un mapa de evaluación. Sin embargo, la radiación solar será establecida generando un mapa con las herramientas de radiación solar que se encuentran en ArcGis 10.1 utilizando el MDS.

Los últimos cálculos que se realizan son el potencial fotovoltaico instalado y la determinación de la energía eléctrica producida anualmente. En el mercado existen diferentes tipos de módulos fotovoltaicos, dependiendo del modelo escogido los resultados serán diferentes debido a que la eficiencia no es la misma para todos ellos.

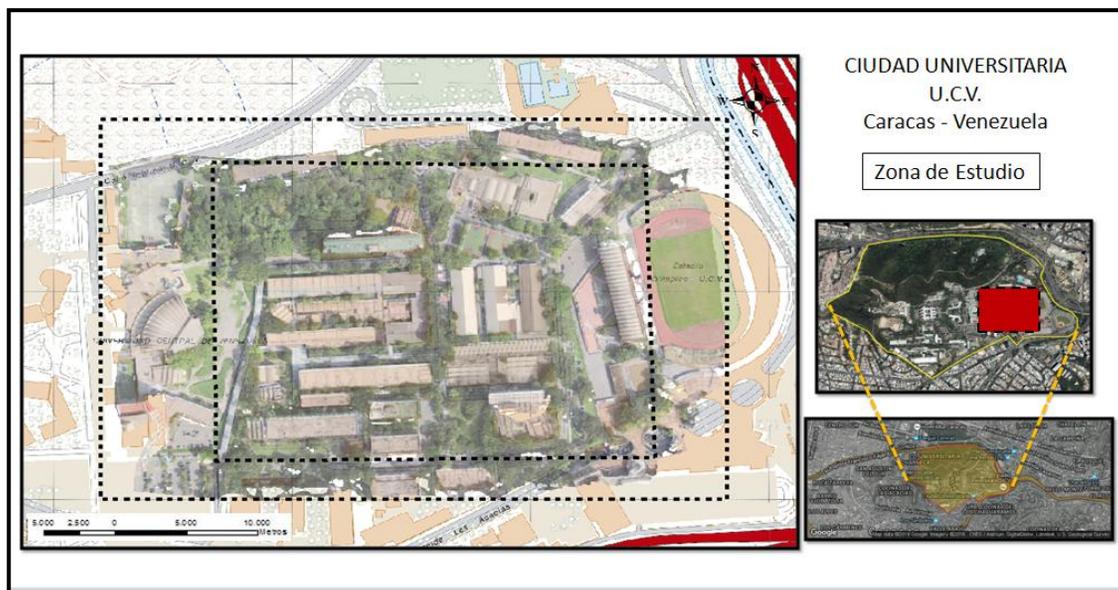
Finalmente se agrupan todos los resultados obtenidos para los edificios de la zona urbana escogida; los cuáles serán la superficie de techos con el área potencialmente favorable para la colocación de arreglos fotovoltaicos, la potencia instalada y la energía producida según el tipo de módulos que se deseen instalar.

Estos resultados se analizarán con sumo cuidado para transmitir una solución final que ayudará a escoger los espacios óptimos y el módulo fotovoltaico que brinde su mayor desempeño durante su utilización

3.1 SELECCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El estudio del presente trabajo especial de grado se realizará en las instalaciones correspondientes a diversos edificios pertenecientes a la Universidad Central de Venezuela (U.C.V.), ubicada en la Ciudad Universitaria de Caracas – Venezuela. Se ha delimitado un área de acuerdo a la ortofoto de aproximadamente 290.000 m², el cual se reduce según la visibilidad de dicha ortofoto de aproximadamente 160.000 m² como muestra para realizar el análisis (Latitud 10° 29' 44" N y Longitud 66° 53' 12" W).

A continuación se presenta en el mapa 1 la delimitación de la zona de muestra para el análisis del estudio que se realizará.



Mapa 1. Delimitación de la zona de estudio

Fuente: Elaboración Propia.

Los edificios involucrados en la zona a estudiar pertenecientes a la U.C.V., corresponden a los siguientes seleccionados:

- Facultad de Humanidades y Educación/ Ciencias Jurídicas y Políticas.
- Facultad de Ingeniería:
 - Edificio de aulas ciclo básico.
 - Edificio de Ingeniería Química, Petróleo, Geología, Minas y Geofísica.
 - Decanato Facultad de Ingeniería.
 - Biblioteca y Auditorio de la Facultad de Ingeniería.
 - Edificio de Física Aplicada.
 - Edificio Ingeniería Eléctrica.
 - Departamento de Química Aplicada.
- Escuela de Estudios Políticos y Administrativos.
- Escuela de Bioanálisis.
- Facultad de Arquitectura y Urbanismo.
- Facultad de Ciencias Económicas y Sociales.

3.2 DATOS DE PARTIDA

En el desarrollo del procedimiento serán necesarias las siguientes capas de información:

a) Modelo 3D de la zona urbana a estudiar.

Fueron proporcionados como dato base por el tutor de este proyecto de investigación el Prof. Julián García, propietario y operador del dron Phantom II Visión FC 200 que posee las siguientes características: focal del lente de 5mm,

resolución de 4384 x 3288, resolución de pixel de 1.41 x 1.41 μm ; a partir del cual se procedió a realizar el vuelo de la zona de la U.C.V., limitada al norte con la Facultad de Ciencias Económicas y Sociales, al sur por la Facultad de Arquitectura, al este con el Estadio Olímpico de Fútbol y al oeste con el Aula Magna de la U.C.V.

Estos datos base derivan de un procedimiento fotogramétrico previo realizado con fotografías tomadas desde el dron, este procedimiento incluyen: un plan de vuelo, el vuelo como tal, un control terrestre, luego se procede a la aerotriangulación, orientación interna y externa, tomando en cuenta la geometría epipolar, procediendo a la correlación automática, y finalizando se obtiene un modelo digital de superficie (ver figura 36), que con limpieza y procesamiento, también se obtiene el modelo digital de Elevación.

- Modelo Digital de Superficie (MDS).
- Modelo Digital de Terreno (MDT).

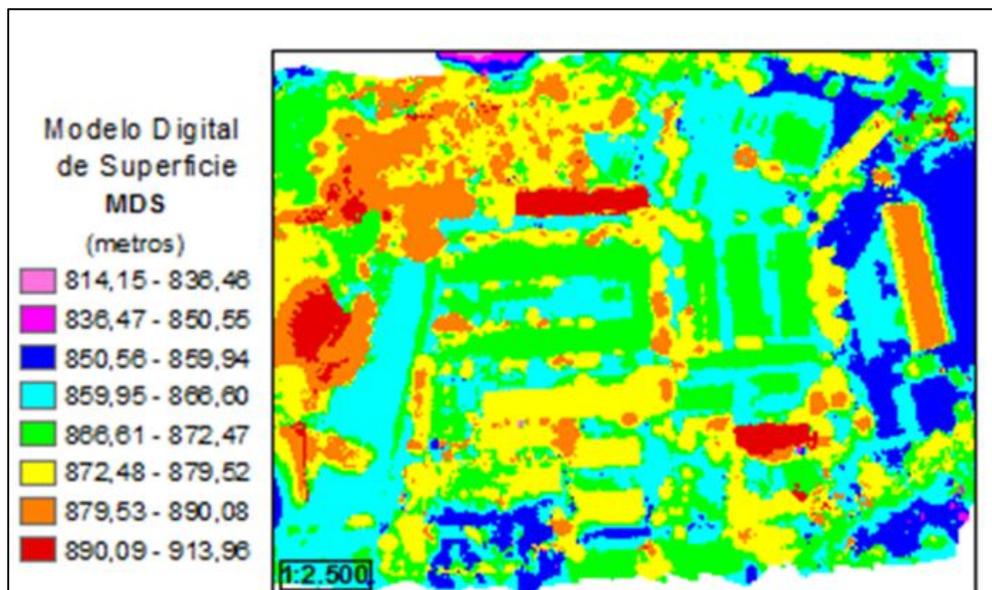


Figura 36. Modelo Digital de Superficie (MDS) de la zona a estudiar. Producto de un procedimiento fotogramétrico a partir de fotografías tomadas por un dron.

Fuente: Producto obtenido por el Prof. Julián García.

b) Ortofoto de la zona de estudio.

Al igual que los modelos 3D es proporcionada como dato base, la cual se generó con imágenes fotográficas tomadas a partir de un dron, debidamente corregidas aplicando el proceso fotogramétrico.

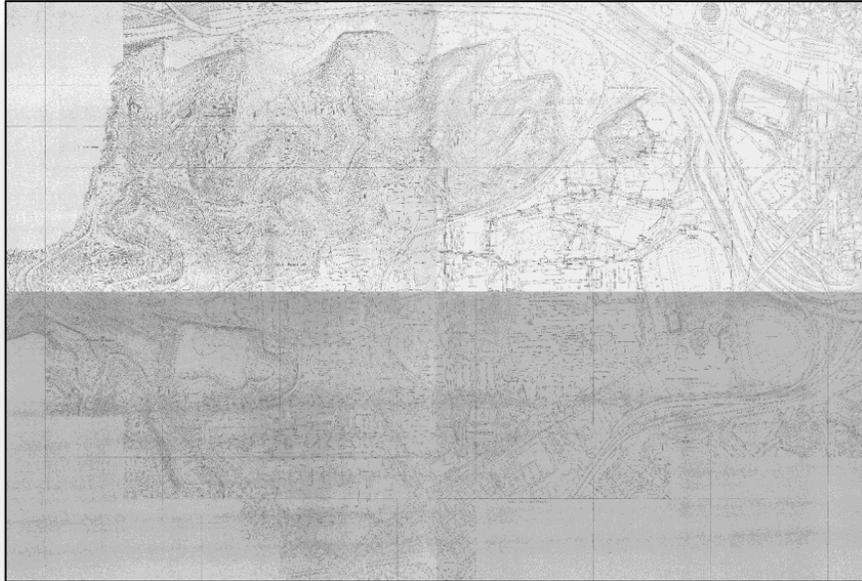


Figura 37. Ortofoto como producto del proceso fotogramétrico de imágenes tomadas mediante un dron.

Fuente: Producto obtenido por el Prof. Julián García.

c) Plano Fotogramétrico en escala 1.1000 de la Ciudad Universitaria de Caracas

La cartografía básica fue producida utilizando métodos estereofotogramétricos con fotografías aéreas de fecha 1989, curvas de nivel a intervalo de 1 metro con distancia reducida a 950 metros, se tomó como referencia altimétrica el nivel medio del mar (nmm) y el mapa tiene como origen de coordenadas el Datum Loma Quintana con coordenadas origen (0,0), (ver figura 38).



**Figura 38. Plano Fotogramétrico de la Ciudad Universitaria de Caracas.
Escala 1:1000. Datum Loma Quintana.**

Fuente: Prof. Luis Liberal digitalizado por Prof. Lucy Bolívar.

Para llevar a cabo los objetivos propuestos, es necesario tener la información básica recolectada en un sistema de proyección unificado, para trabajar de acuerdo a los parámetros actuales establecidos para Venezuela SIRGAS-REGVEN con referencia al Datum WGS84, este plano fotogramétrico se lleva al Datum correspondiente de acuerdo al cálculo de la Transformación Lineal Conforme con más de dos puntos comunes, hoja de cálculo elaborada por el Prof. Douglas Bravo, que luego fue georeferenciada con la finalidad de posicionar espacialmente la información básica recolectada.

d) Capa de polígonos con la delimitación de los edificios.

Esta capa de polígonos es creada a partir de la ortofoto de la zona a estudiar, el Modelo Digital de Superficie (MDS) y con ayuda de la cartografía de la zona a escala 1:1000, para sitios de poca visibilidad.

e) Tabla con los datos de la Posición del Sol.

Se obtiene a través de un servicio web, llamado «SunEarthTools.com» (figura 39), el cual se puede visualizar en varios idiomas (inglés, español, italiano, portugués, alemán, francés), es un sistema que ofrece acceso a una colección de herramientas relacionada con la energía solar. Cálculo de: la posición del sol, las coordenadas, sistemas fotovoltaicos, emisiones de CO₂, entre otras aplicaciones.

La principal característica de este portal es que no constituye en sí mismo una librería de datos, sino que se trata de un enlace a recursos que se encuentran situados en diferentes países, donde sólo es necesario utilizar la latitud y longitud del lugar.

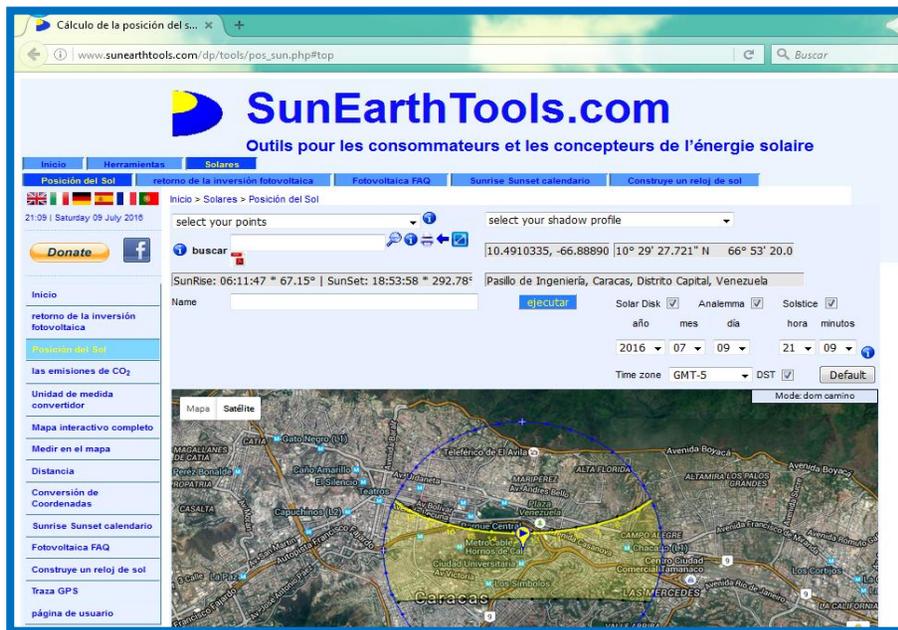


Figura 39. Portal SunEarthTools.com

Fuente: Captura de pantalla del portal web.

Varios de los servicios disponibles que proporciona la página son:

- Los datos más el mapa de ubicación con el gráfico polar, como se muestra en la figura 40 que sigue.

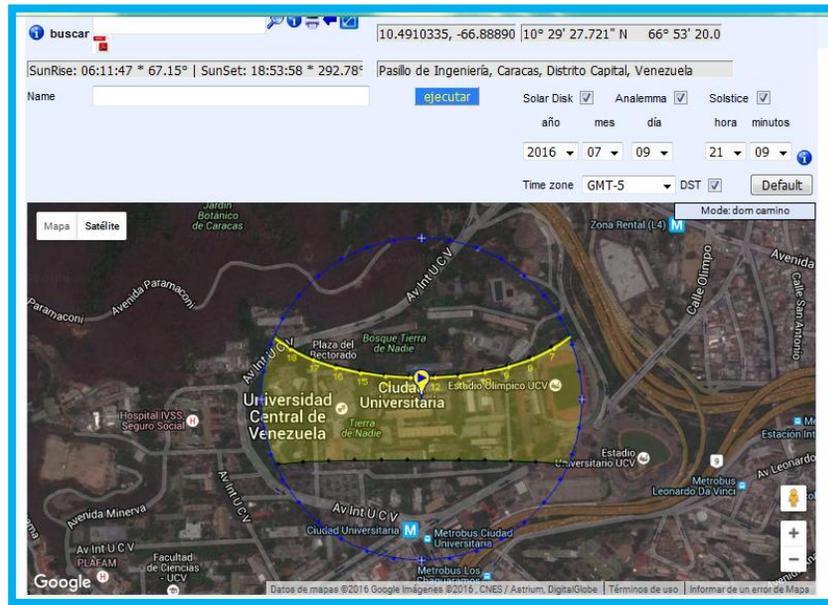


Figura 40. Mapa con gráfico polar del lugar

Fuente: Captura de pantalla desde el portal web: SunEarthTools.com

- Un gráfico Polar (Carta Estereográfica) y Cartesiano (Carta Cilíndrica), correspondientes a las Cartas Solares del lugar, mostrando latitud y longitud del lugar, a demás de una fecha determinada con la posición del sol en las cartas, según se indica en las figuras 41 y 42.

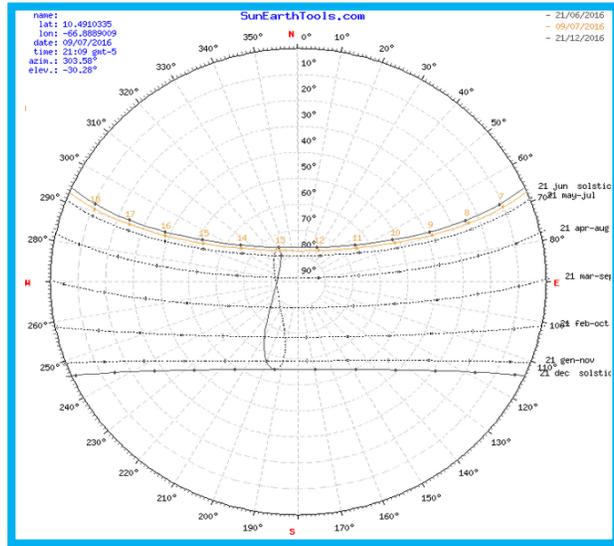


Figura 41. Carta Estereográfica

Fuente: Página web: sunearthtools.com

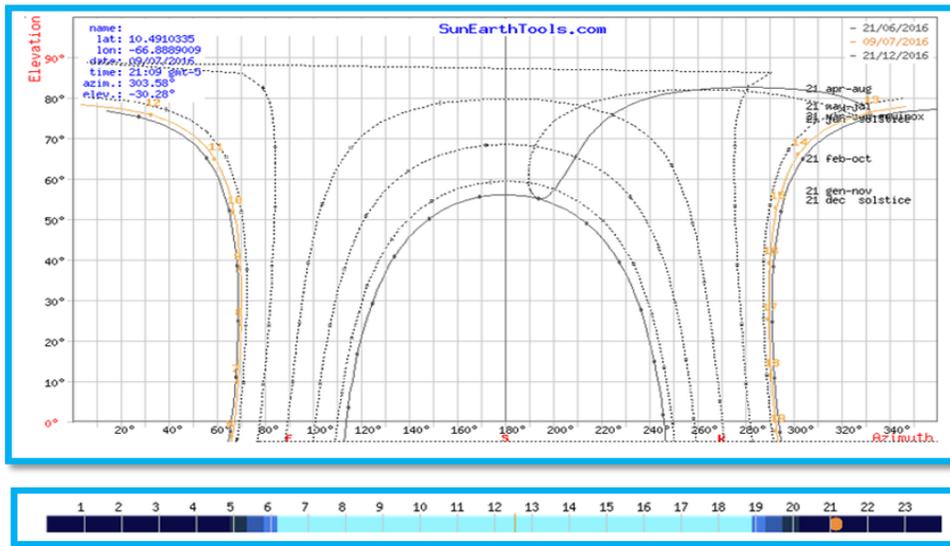


Figura 42. Carta Cilíndrica

Fuente: Página web: sunearthtools.com

- Trayectoria del Sol anual, el cálculo de la situación relativa del Sol y la Tierra. El algoritmo que han desarrollado tiene un orden de exactitud de aproximadamente $0,005^\circ$ y es válido durante el periodo. Este portal web genera una tabla con los datos de la posición solar para una zona determinada, seleccionando la fecha, la zona horaria (GMT Greenwich Mean Time) y el intervalo de tiempo deseado definido en minutos (por defecto establece 60 min).

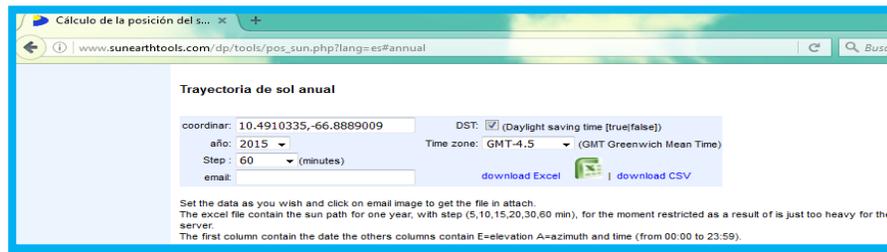


Figura 43. Aplicación para la descarga del archivo en tabla Excel

Fuente: Página web: sunearthtools.com

A	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE
coord: 10.4947584, -66.8864623	E 08:00:00	A 08:00:00	E 09:00:00	A 09:00:00	E 10:00:00	A 10:00:00	E 11:00:00	A 11:00:00	E 12:00:00	A 12:00:00	E 13:00:00	A 13:00:00	E 14:00:00	A 14:00:00
01/01/2015	2.47	113.94	15.75	117.72	28.46	123.53	40.12	132.51	49.77	146.52	55.66	167.25	55.78	191.88
02/01/2015	2.38	113.84	15.68	117.60	28.41	123.39	40.09	132.33	49.78	146.31	55.72	167.03	55.89	191.72
03/01/2015	2.30	113.72	15.61	117.47	28.35	123.24	40.06	132.15	49.79	146.09	55.79	166.80	56.01	191.58
04/01/2015	2.22	113.60	15.54	117.34	28.31	123.08	40.04	131.96	49.81	145.86	55.86	166.58	56.13	191.43
05/01/2015	2.14	113.47	15.48	117.20	28.26	122.92	40.03	131.76	49.84	145.63	55.94	166.35	56.26	191.29
06/01/2015	2.06	113.34	15.42	117.05	28.22	122.75	40.01	131.56	49.87	145.40	56.03	166.12	56.39	191.15
07/01/2015	1.99	113.20	15.36	116.90	28.19	122.57	40.01	131.35	49.91	145.16	56.12	165.89	56.54	191.02
08/01/2015	1.92	113.05	15.31	116.73	28.16	122.39	40.01	131.14	49.95	144.91	56.23	165.65	56.69	190.90
09/01/2015	1.85	112.89	15.26	116.57	28.13	122.20	40.02	130.92	50.00	144.66	56.33	165.42	56.84	190.77
10/01/2015	1.79	112.73	15.22	116.39	28.11	122.01	40.03	130.69	50.06	144.40	56.45	165.18	57.00	190.66
11/01/2015	1.73	112.56	15.18	116.21	28.09	121.80	40.04	130.46	50.12	144.14	56.57	164.95	57.17	190.55
12/01/2015	1.68	112.39	15.14	116.03	28.08	121.60	40.06	130.22	50.19	143.87	56.70	164.71	57.35	190.44
13/01/2015	1.62	112.21	15.11	115.83	28.07	121.38	40.09	129.97	50.27	143.60	56.84	164.47	57.53	190.34
14/01/2015	1.58	112.02	15.08	115.64	28.07	121.16	40.12	129.72	50.35	143.33	56.98	164.23	57.72	190.24
15/01/2015	1.53	111.83	15.05	115.43	28.07	120.94	40.16	129.47	50.43	143.05	57.13	163.98	57.91	190.15
16/01/2015	1.49	111.63	15.03	115.22	28.08	120.71	40.20	129.21	50.53	142.76	57.29	163.74	58.11	190.07
17/01/2015	1.45	111.42	15.02	115.01	28.09	120.47	40.25	128.94	50.63	142.47	57.45	163.49	58.32	189.99
18/01/2015	1.42	111.21	15.00	114.78	28.10	120.23	40.30	128.67	50.73	142.17	57.62	163.25	58.53	189.92
19/01/2015	1.39	110.99	15.00	114.56	28.13	119.98	40.36	128.39	50.85	141.87	57.79	163.00	58.75	189.85
20/01/2015	1.36	110.77	14.99	114.32	28.15	119.73	40.43	128.11	50.96	141.57	57.98	162.75	58.97	189.79
21/01/2015	1.34	110.54	14.99	114.09	28.18	119.47	40.50	127.82	51.09	141.26	58.16	162.50	59.20	189.74
22/01/2015	1.32	110.31	15.00	113.84	28.21	119.20	40.57	127.52	51.21	140.95	58.36	162.24	59.44	189.70
23/01/2015	1.31	110.07	15.01	113.60	28.25	118.93	40.65	127.22	51.35	140.63	58.56	161.99	59.68	189.66
24/01/2015	1.30	109.82	15.02	113.34	28.30	118.66	40.73	126.92	51.49	140.30	58.77	161.74	59.92	189.63

Figura 44. Documento Excel descargado correspondiente a la posición del Sol cada hora, desde las 8 am a 7pm, de cada día del año. (Coordenadas, fechas, Elevación (E) y Azimut (A) y horas del día)

Fuente: Datos obtenidos de la página web: sunearthtools.com

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN	ACIMUTH
2015	3	1	8	3,49	87,20
2015	3	1	10	32,36	92,74
2015	3	1	12	59,27	103,79
2015	3	1	14	71,31	228,65
2015	3	1	16	50,77	263,17
2015	3	1	18	22,83	270,17
2015	3	2	8	3,62	87,57
2015	3	2	10	32,52	93,21
2015	3	2	12	59,53	104,66
2015	3	2	14	71,66	226,63
2015	3	2	16	50,90	262,52
2015	3	2	18	22,88	269,74
2015	3	3	8	3,74	87,94
2015	3	3	10	32,68	93,67
2015	3	3	12	59,79	105,51
2015	3	3	14	72,01	224,69
2015	3	3	16	51,02	261,86
2015	3	3	18	22,92	269,31
2015	3	4	8	3,86	88,32
2015	3	4	10	32,84	94,13
2015	3	4	12	60,06	106,36
2015	3	4	14	72,36	222,83
2015	3	4	16	51,14	261,21
2015	3	4	18	22,96	268,88

Figura 45. Tabla de posición del Sol con el formato de hoja de cálculo de Excel (.xlsx)

Fuente: Elaboración propia.

f) Tabla del Promedio de la Radiación Solar Global.

Se muestran datos del promedio mensual de radiación solar directa de la zona de estudio (Ciudad Universitaria de Caracas, UCV) correspondientes a los últimos 22 años. Datos suministrados por el Departamento de Hidrometeorología de la UCV. Estos valores son mensuales durante un período de radiación global solar, en unidades kwh/m^2 (kilo watts horas por metros cuadrados).

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Ubicación Geográfica	Latitud 10,495						Longitud -66,886						
Meses	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	
Promedio mensual (22 años) kwh/m ²	6,38	6,17	6,17	5,12	4,75	4,87	5,34	5,33	5,32	5,19	5,37	5,77	

Figura 46. Tabla de datos Organizados en Excel: Radiación Solar Global

Fuente: Elaboración Propia.

3.3 GENERACIÓN DE CARTOGRAFÍA BASE DEL PROYECTO A DESARROLLAR A PARTIR DE LA ACTUALIZACIÓN.

Es necesario tener una capa con los polígonos de los techos de los edificios que se utilizarán en futuros procedimientos y serán aplicados para crear nuevas capas de estimación de criterios. A esto le llamamos generación cartográfica que será nuestra base para el desarrollo del proyecto, por definición una actualización de datos que serán posteriormente utilizados como una capa base cartográfica; por lo cual no se utilizan las normativas básicas de la cartografía.

Para ello se utiliza como apoyo el modelo 3D de la zona, el cual ha sido suministrado como dato base desde el comienzo del presente trabajo, El cual corresponde al Modelo Digital de Superficie (MDS), también nos apoyamos en la Ortofoto del lugar y sólo para sitios con poca visibilidad causados por el arbolado de la zona utilizamos la cartografía del lugar (Georeferenciada WGS84 de escala 1:1000).

Esta delimitación se lleva a cabo con el software ArcGis 10.1, con la barra de herramientas de dibujo, el cual permite la edición del shape (archivo vectorial) de polígonos de techos en las edificaciones e incluso otros que se pueden denotar en la ortofoto y el Modelo Digital de Superficie. En las siguientes figuras se puede apreciar la realización de la delimitación apoyándonos en el MDS (Figura 47) y en la ortofoto (Figura 48) correspondientes al lugar.

Ofreciendo como resultado un producto final de los techos de las edificaciones actualizados de la cartografía básica, necesario para el desarrollo de posteriores aplicaciones en el trabajo; siendo una capa base de digitalización de techos de las edificaciones correspondientes a la delimitación de la zona de estudio (Mapa 2) anexo en el apéndice VI.

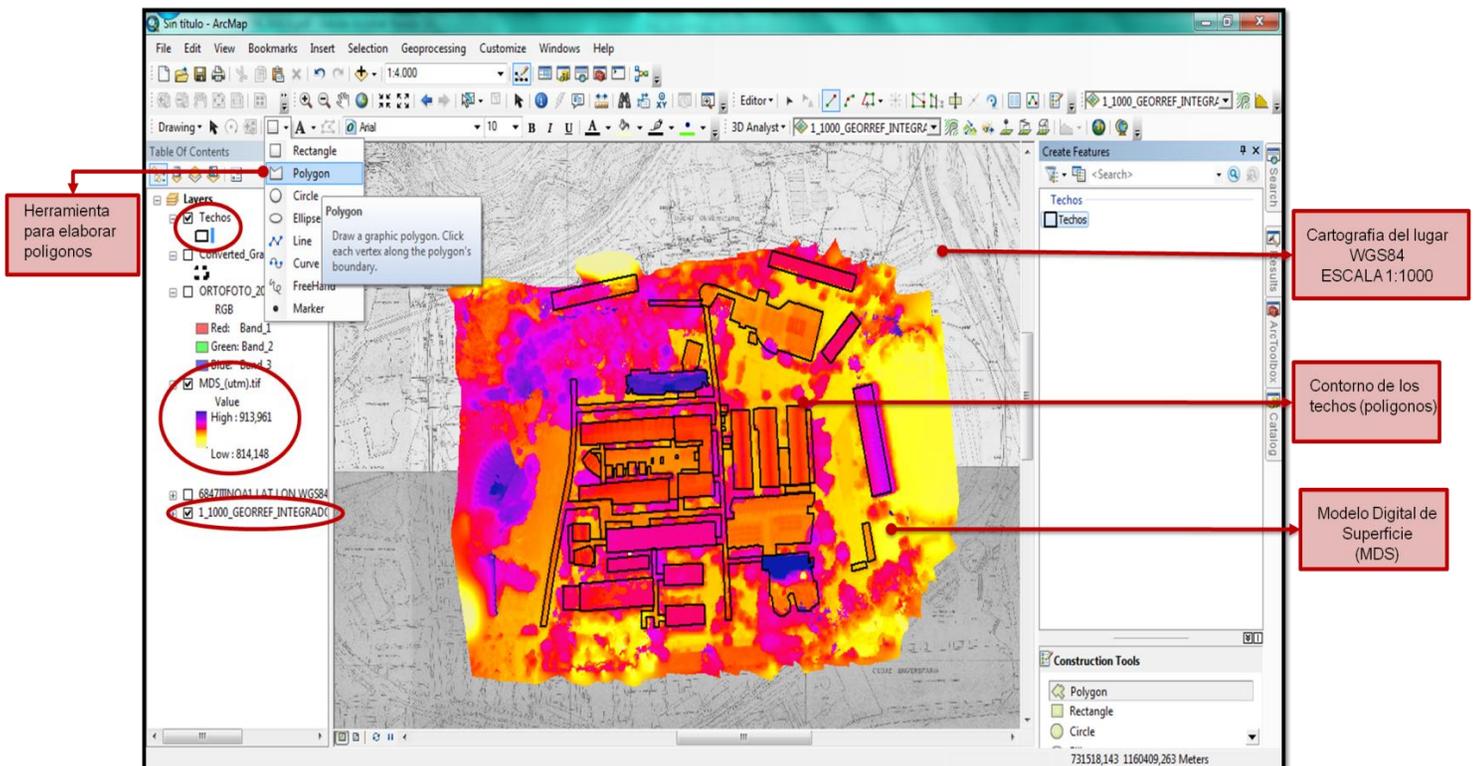


Figura 47. Delimitación Utilizando el MDS

Fuente: Elaboración Propia.

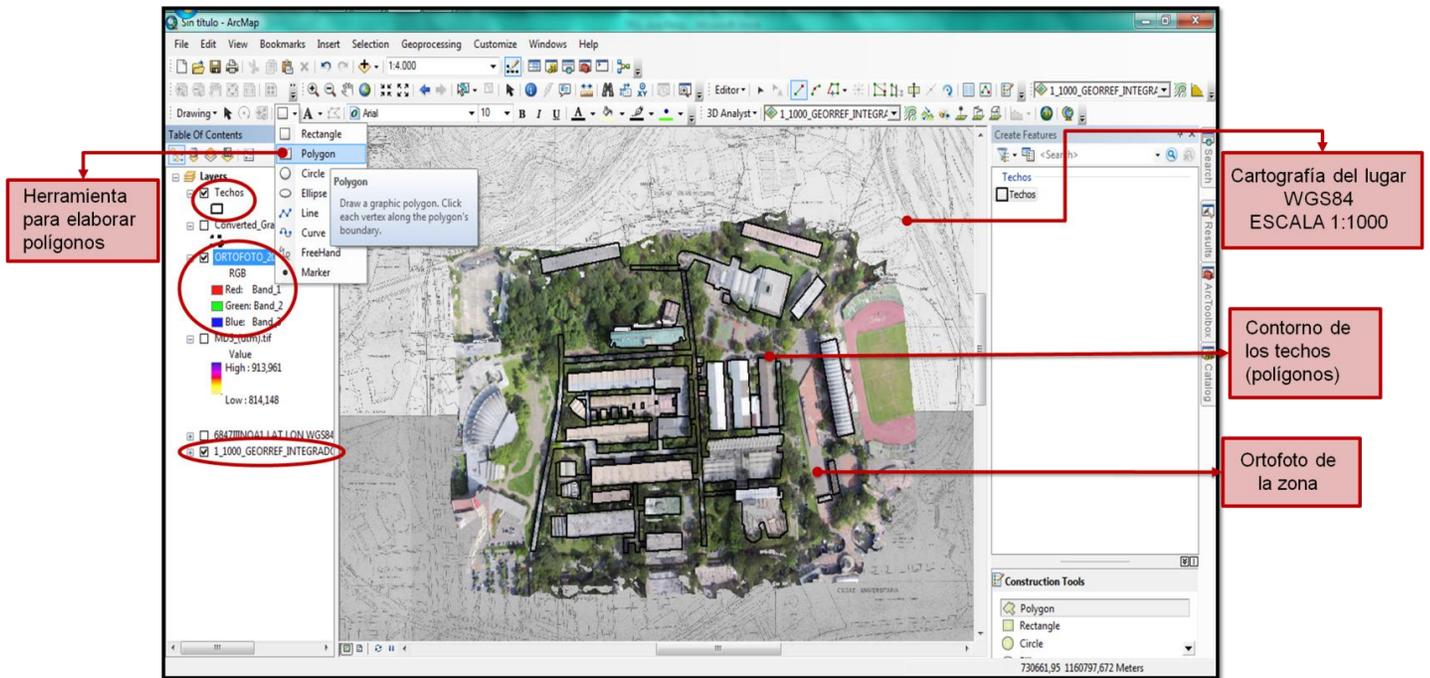


Figura 48. Delimitación utilizando la Ortofoto
Fuente: Elaboración Propia.



Mapa 2. Actualización de los techos de la cartografía básica para el desarrollo del proyecto.
Fuente: Elaboración Propia.

3.4 SUPERFICIE DE LOS TECHOS DISPONIBLES

En el cálculo para la determinación de la superficie disponible de techos se llevará a cabo mediante un análisis multicriterio booleano que permitirá establecer la superficie útil para instalaciones de arreglos fotovoltaicos y descartará aquellas áreas inadecuadas.

En el análisis, primero se determinan las condiciones que deben cumplir cada uno de los factores (restricciones). En este proceso se asigna valor 1 cuando los factores cumplen las condiciones establecidas y valor 0 cuando no la cumplen, obteniéndose como resultados una serie de capas binarias que representan cada una de las restricciones. Posteriormente, se combinan las capas dando como resultado aquellas áreas de los techos que cumplen con todas los criterios definidos.

3.4.1 Criterios

Los criterios se definen estudiando aquellos factores que afectan el rendimiento de un panel fotovoltaico. Las variables como reflexión de los rayos incidentes no se toma en cuenta como un criterio, debido a que la disminución de este tipo de pérdida depende de la fabricación del panel; la energía de luz incidente no será utilizada como un criterio sino como un dato para futuros procedimientos ya que estos son los niveles de radiación de la zona, generando un mapa de radiación solar; el efecto de la temperatura es un parámetro que afecta directamente la generación de energía en un panel fotovoltaico, el cual se evaluará estudiando la temperatura del lugar más no se utilizará como un criterio, aunque se tomará en cuenta como un recurso para futuras evaluaciones, determinando un mapa de horas de Sol (irradiación).

Luego de descartar ciertos factores quedan ya definidos los criterios que se van a considerar en este trabajo debido a su importancia, estos son los siguientes:

- Pérdidas de energía ocasionadas por la inclinación.
- Pérdidas ocasionadas por la orientación de los techos.
- Superficie de los techos afectada por las sombras generadas por cualquier elemento circundante.
- Superficie de los techos destinada al acceso a los arreglos fotovoltaicos para su mantenimiento.
- Presencia de monumentos, edificios singulares, y techos irregulares que no pertenezcan a edificaciones.

Estos criterios se determinarán a partir del MDS obtenido como dato base en el inicio del presente trabajo. Utilizando las herramientas específicas para superficies de análisis espacial en ArcGis 10.1 se pueden identificar los patrones que definen cada uno de los criterios.

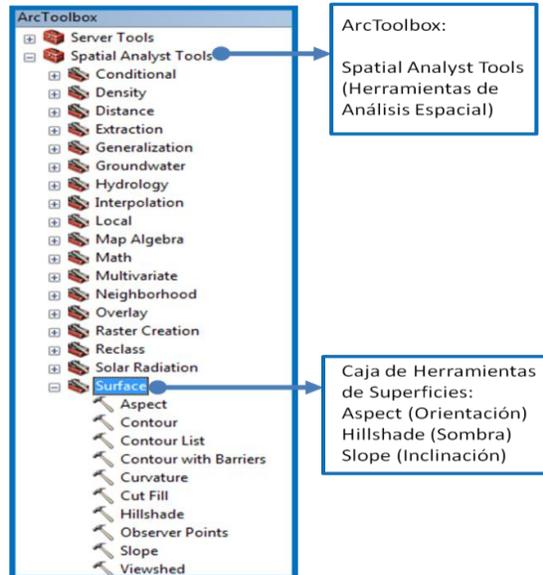


Figura 49. Conjunto de herramientas disponibles para superficies en modelos raster en ArcGis 10.1

3.4.2 Efecto por la inclinación

Se define como Inclinación el ángulo formado por el plano del módulo y el plano horizontal. El ángulo de inclinación para optimizar la producción energética anual suele ser algunos grados inferior a la latitud local.

Previamente al cálculo de la inclinación de los techos de los edificios se procede a extraer los mismos del MDS utilizando como máscara la capa de polígonos que delimitan los edificios definida anteriormente.

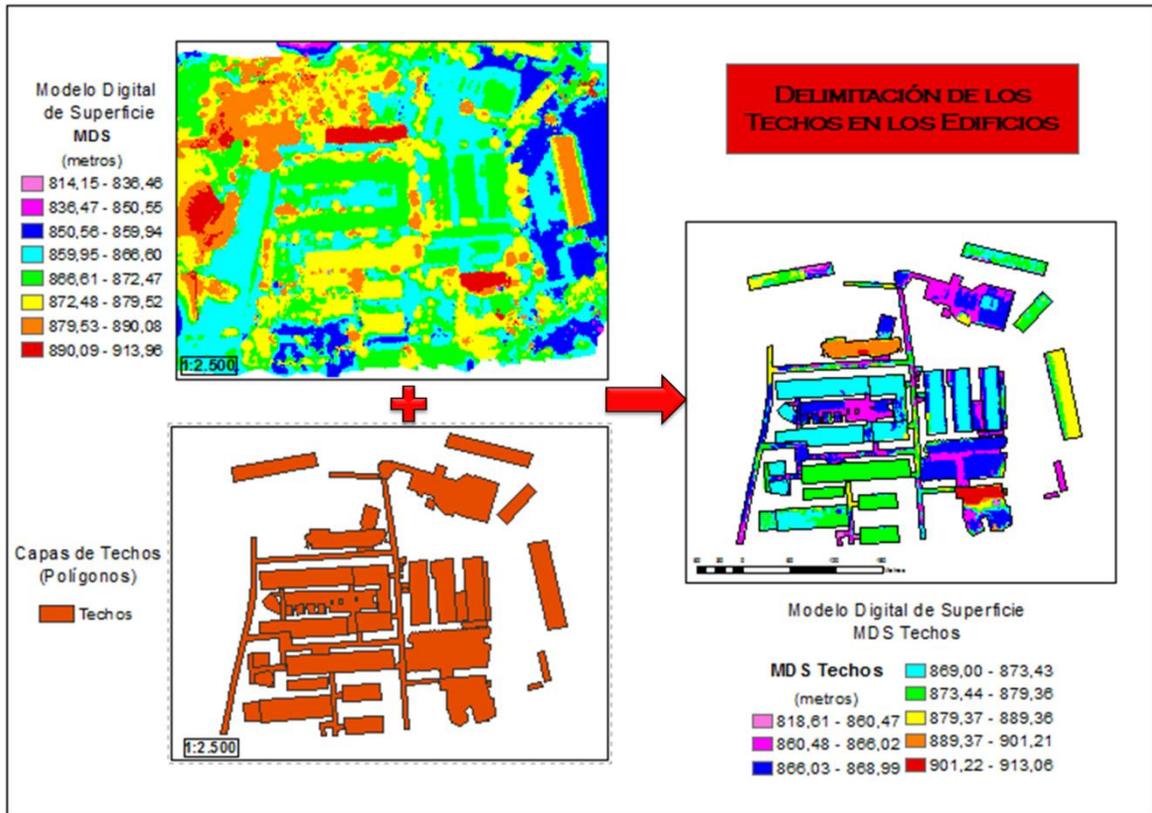


Figura 50. MDS de techos. Máscara de polígonos de techos de las edificaciones

Fuente: Elaboración Propia.

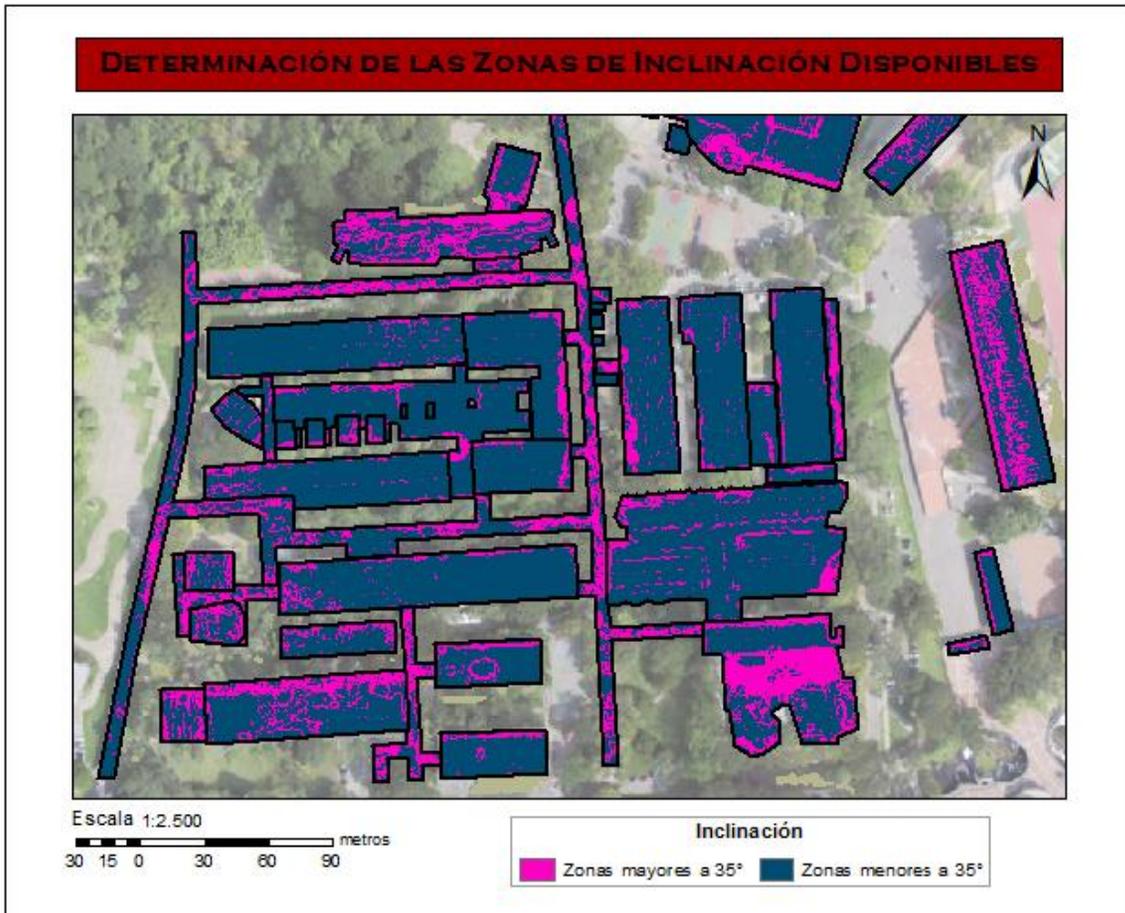
La inclinación de los techos se calcula con el MDS de los edificios aplicando la herramienta para generar pendientes, utilizando la caja de herramientas de análisis espacial en ArcGis 10.1. Las unidades de medida utilizadas en el cálculo serán los grados y el rango de valores de las pendientes resultantes oscilará entre 0 y 90, como se muestra en el mapa (3). Para crear la capa binaria de Inclinación es necesaria una reclasificación, de acuerdo a normativas de eficiencia para colocación de paneles fotovoltaicos se recomiendan que la inclinación sea menor a 35 grados; lo que nos ayuda a reclasificarlo tomando como valor 1 la inclinación menor a 35° y valor 0 se le asignará valores de inclinación mayores a los 35°; obteniendo así la capa binaria de inclinación que se aprecia en el mapa (4), la cual

se utilizará como criterio para determinar la superficie, en área, de disponibilidad para la instalación de los paneles fotovoltaicos.



Mapa 3. Inclinación de los techos. Utilizando la herramienta «Slope» de ArcGis 10.1

Fuente: Elaboración Propia.



Mapa 4. Determinación de la inclinación menor a 35° en los techos de las edificaciones

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.2.1 Función de la herramienta Slope (pendiente) en ArcGis 10.1

Para cada celda, la herramienta pendiente calcula la tasa máxima de cambio del valor de esa celda a sus vecinas. Básicamente, el cambio máximo en la elevación sobre la distancia entre la celda y sus ocho vecinas identifica el descenso cuesta abajo más empinado desde la celda.

Conceptualmente, la herramienta ajusta un plano a los valores z de una vecindad de celdas de 3 x 3 alrededor de la celda de procesamiento o central. El valor de pendiente de este plano se calcula mediante la técnica de promedio máximo. La dirección a la que apunta el plano es la orientación para la celda de procesamiento. Mientras menor sea el valor de la pendiente, más plano será el terreno; mientras más alto sea el valor de la pendiente, más empinado será el terreno.

El raster de pendiente de salida se puede calcular en dos tipos de unidades: grados o porcentaje (elevación en porcentaje). La elevación en porcentaje puede comprenderse mejor si se la considera como la elevación dividido por el avance, multiplicado por 100.

En el ejemplo siguiente, se considera el triángulo **B** con ángulo de 45° con un porcentaje de valor a 100%. A medida que la pendiente alcanza la vertical (90°), el triángulo **C** el porcentaje se acerca al infinito.

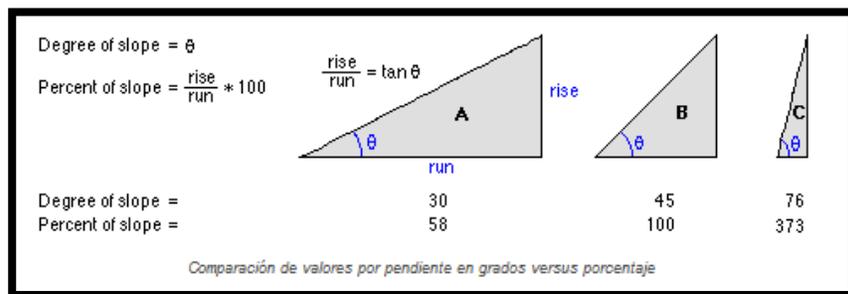
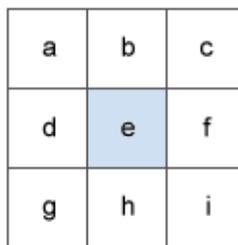


Figura 51. Comparación de valores por pendiente en grados versus porcentaje

Fuente: ESRI, 2014. *Biblioteca de ayuda de ArcGIS 10.1.*

- El algoritmo de la pendiente¹¹

Las tasas de cambio (delta) de la superficie en las direcciones horizontal (dz/dx) y vertical (dz/dy) desde la celda central determinan la pendiente. Los valores de la celda central y sus ocho vecinas determinan las deltas horizontal y vertical. Las vecinas se identifican como letras, desde **a** hasta **i**, con la letra **e** representando a la celda para la cual se calcula la orientación. El algoritmo básico utilizado para calcular la pendiente es:



Ventana de escaneado de superficie

La tasa de cambio en la dirección x de la celda **e** se calcula con el siguiente algoritmo:

$$[dz/dx] = ((c + 2f + i) - (a + 2d + g)) / (8 \times x_cellsize)$$

La tasa de cambio en la dirección y de la celda **e** se calcula con el siguiente algoritmo:

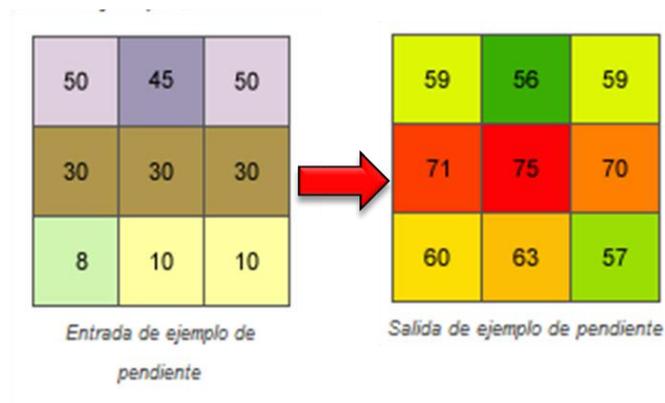
$$[dz/dy] = ((g + 2h + i) - (a + 2b + c)) / (8 \times y_cellsize)$$

¹¹ ESRI, 2014. *Biblioteca de ayuda de ArcGIS 10.1*. Consultado a través de la página web oficial: <<http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/>>

Tomando la tasa de cambio en la dirección x e y, la pendiente de la celda central **e** se calcula utilizando:

$$rise_run = \sqrt{([dz/dx]^2 + [dz/dy]^2)}$$

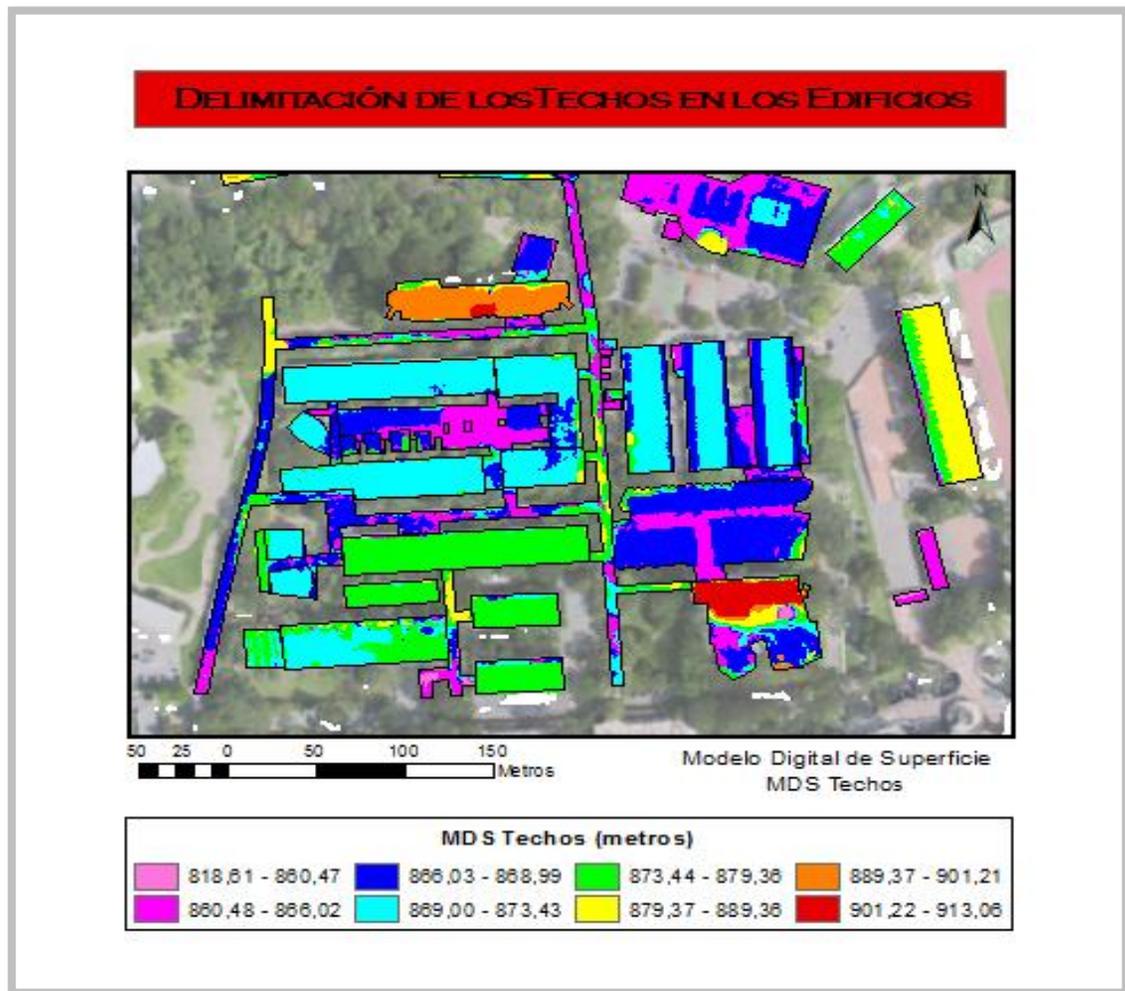
$$slope_degrees = \tan^{-1}(rise_run) \times (180/\pi)$$



3.4.3 Efecto por la orientación

Se puede definir como orientación al ángulo formado por la proyección sobre el plano horizontal de la normal al plano del módulo y la dirección óptima. En el hemisferio norte se utiliza la dirección sur y en el hemisferio sur la dirección norte.

Al igual que la inclinación, previamente al cálculo de la orientación de los techos de los edificios es necesario realizar la extracción de los mismos del MDS utilizando como máscara la capa de polígonos de techos delimitados y obtener un Modelo Digital de Superficie de los techos.

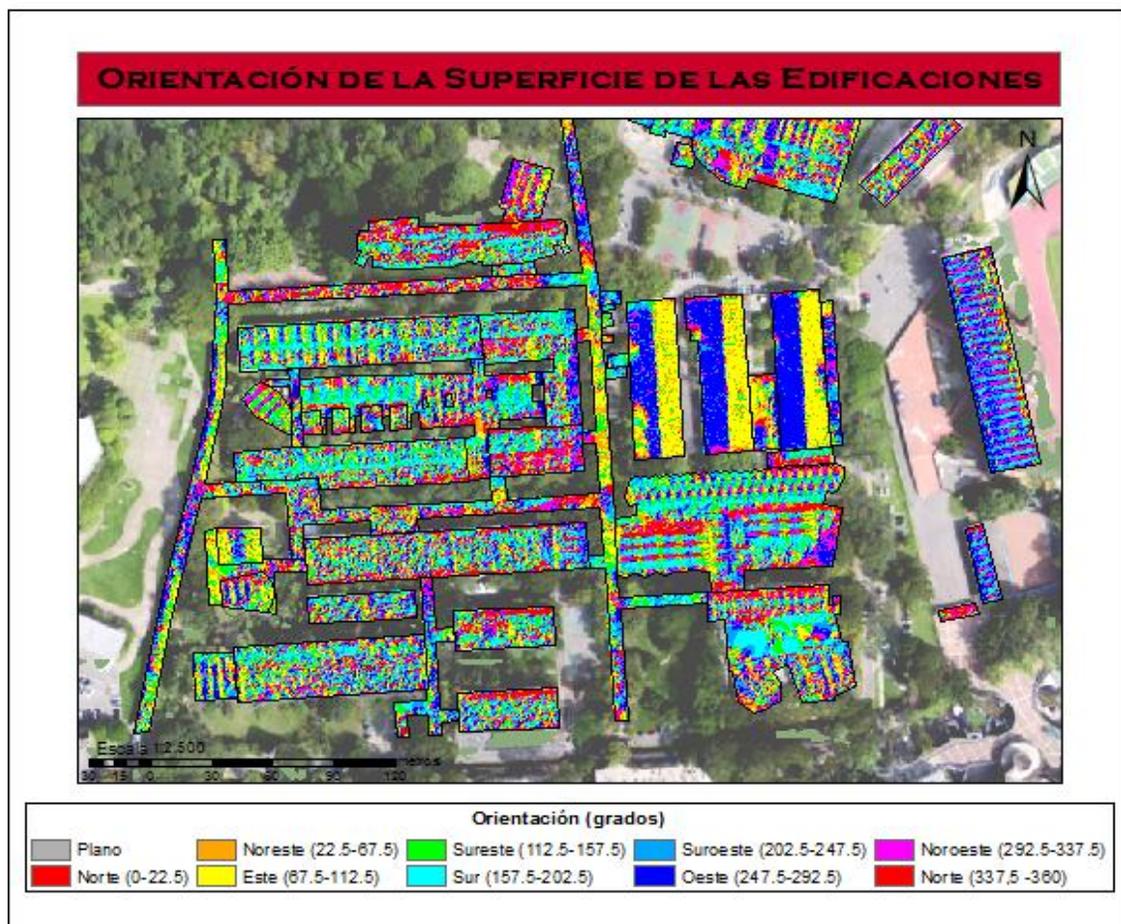


Mapa 5. MDS Techos. Delimitación del contorno de los edificios

Fuente: Elaboración Propia.

A partir del MDS de los edificios el cálculo de la posición de los techos se realiza con la caja de herramientas de análisis espacial de ArcGis 10.1 que determina la orientación «Aspect». En esta herramienta, los valores de orientación obtenidos para los techos que presentan una cierta inclinación se expresan en grados de 0 a 360 (medidos siempre desde el norte en sentido horario) y a los techos planos se

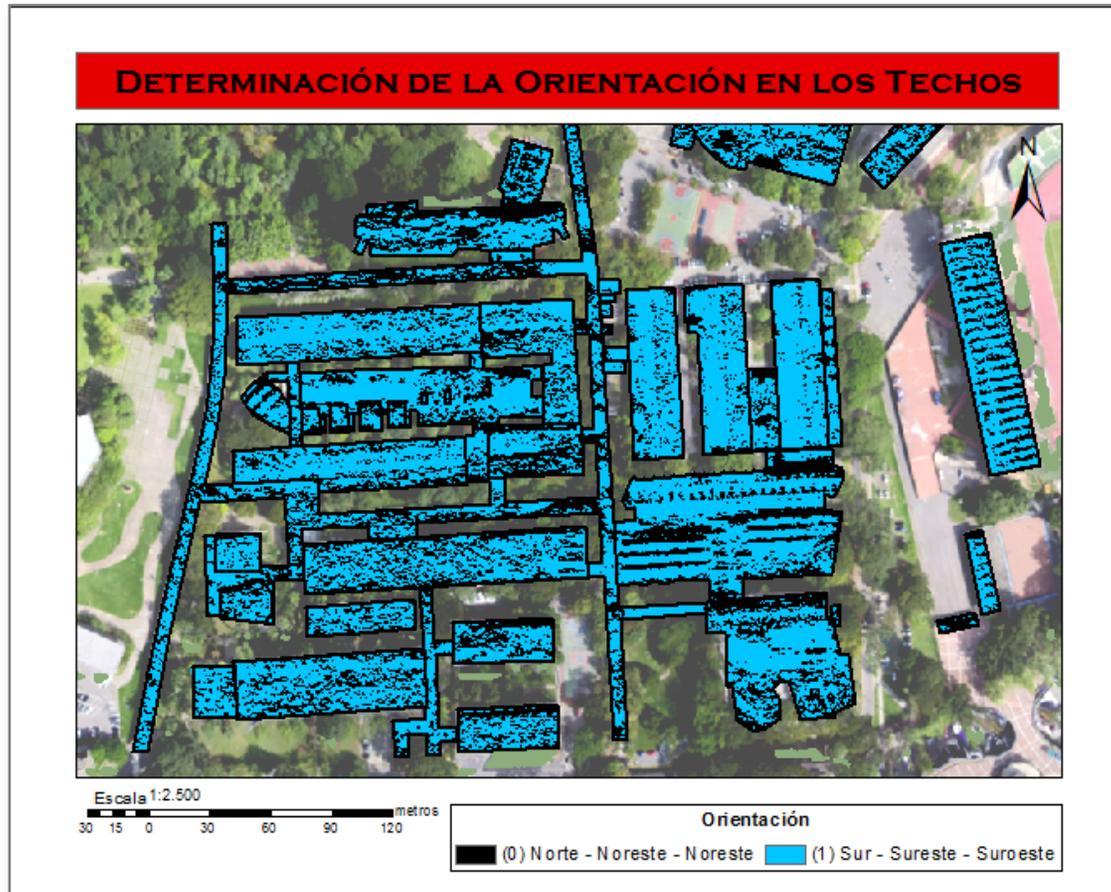
les asigna valor -1, mostrado en el mapa (6). Sin embargo, para crear la capa de orientación correspondientes a los techos con inclinación adecuada para instalación de paneles, se debe realizar una reclasificación tomando como valor de 1 para la orientación Sur, Sureste, Suroeste y valor de 0 para orientación Norte, Noreste, Noroeste, obteniendo una capa binaria que será utilizada posteriormente, la cual se observa en el mapa (7).



Mapa 6. Orientación de los Techos. Utilizando la herramienta «Aspect» de ArcGis

10.1

Fuente: Elaboración Propia.



Mapa 7. Determinación de la Orientación Sur, Sureste y Suroeste en los techos

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.3.1 Función de la herramienta Aspect (orientación) en ArcGis 10.1

La Orientación identifica la dirección de la pendiente descendente de la tasa de cambio máxima en un valor desde cada celda hacia sus vecinas. Puede pensarse como la dirección de la pendiente. Los valores de cada celda del raster de salida indican la dirección de brújula a la que apunta la superficie en esa ubicación. Se mide en el sentido de las agujas del reloj en grados de 0 (hacia el norte) a 360 (hacia el norte, nuevamente), formando un círculo completo. El valor de cada

celda de un dataset de orientación indica la dirección a la que apunta la pendiente de la celda.

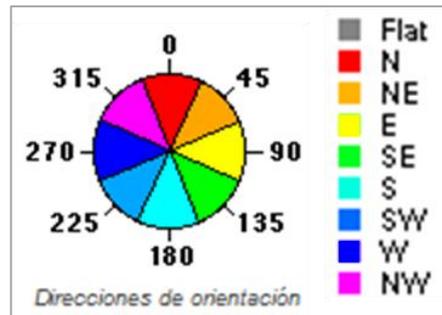


Figura 52. Direcciones de la orientación que se usa en ArcGis

Fuente: ESRI, 2014. *Biblioteca de ayuda de ArcGIS 10.1.*

Conceptualmente, la herramienta Orientación ajusta un plano a los valores z de una vecindad de celdas de 3 x 3 alrededor de la celda de procesamiento o central. La dirección a la que apunta el plano es la orientación para la celda de procesamiento.

Esta herramienta es de utilidad para calcular la iluminación solar para cada ubicación de una región como parte de un estudio para determinar la diversidad de vida en cada sitio.

- El algoritmo de la orientación¹²

Una ventana de 3 x 3 móvil visita cada celda del raster de entrada y, para cada celda en el centro de la ventana, se calcula un valor de orientación mediante un algoritmo que incorpora los valores de las ocho vecinas de la celda. Las celdas se

¹² ESRI, 2014. *Biblioteca de ayuda de ArcGIS 10.1.* Consultado a través de la página web oficial: <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/>

identifican como letras, desde **a** hasta **i**, con la letra **e** representando la celda para la cual se calcula la orientación.

a	b	c
d	e	f
g	h	i

Ventana de escaneado de superficie

La tasa de cambio en la dirección x de la celda **e** se calcula con el siguiente algoritmo:

$$[dz/dx] = ((c + 2f + i) - (a + 2d + g))/8$$

La tasa de cambio en la dirección y de la celda **e** se calcula con el siguiente algoritmo:

$$[dz/dy] = ((g + 2h + i) - (a + 2b + c))/8$$

Tomando la tasa de cambio en la dirección x e y de la celda **e**, la orientación se calcula utilizando:

$$Aspect = 180/\pi \times atan2([dz/dy], -[dz/dx])$$

El valor orientación después de convierte a valores de dirección de brújula (0 a 360 grados), de acuerdo a la siguiente regla:

si $Aspect < 0$ **el valor de la celda** $cell = 90.0 - Aspect$

si $Aspect > 90$ **el valor de la celda** $cell = 360.0 - Aspect + 90.0$

si $0 < Aspect < 90$ el valor de la celda $cell = 90.0 - Aspect$



3.4.4 Efecto de la sombra de la zona estudio

El efecto de sombras sobre los paneles solares, afecta notoriamente el rendimiento de estos, es por ello que se debe abordar al momento de diseñar una instalación fotovoltaica, situar los paneles en lugares donde no sufran este tipo de interferencia.

En el análisis de sombras hay que considerar diferentes elementos: edificaciones adyacentes, zonas arboladas, muros o cualquier otro elemento alrededor. Se calcula el mapa anual de sombras para la zona de estudio.

Para el cálculo de las sombras se utiliza la herramienta «Hillshade» de la caja de herramientas de superficies raster del módulo análisis 3D del Software ArcGis 10.1, la aplicación de ésta herramienta determina la iluminación de una zona a partir del modelo raster de superficie MDS teniendo en cuenta la posición del Sol y las sombras. Permite estimar si una zona está sombreada o no y las dimensiones de las sombras en un tiempo dado.

El criterio a considerar establece que de la superficie total disponible en los techos se eliminan las zonas afectadas por sombras en las horas centrales del día a lo largo del año, suponiendo la hora solar verdadera.

En este caso se va a calcular el mapa anual de sombras para la zona de estudio haciendo 6 registros diarios cada 3 meses durante un año:

- Hora: desde las 8:00 hasta las 18:00, con 2h de intervalo.
- Meses: Se realizará durante los meses de cambios de estación.
 - ✓ Marzo (Equinoccio de Primavera. 20 de Marzo)
 - ✓ Junio (Solsticio de Verano. 21 de Junio)
 - ✓ Septiembre (Equinoccio de Otoño. 22 de Septiembre)
 - ✓ Diciembre (Solsticio de Invierno. 21 de Diciembre)
- Año: 2015.

Para ello, primero se generarán mapas de sombras de todos los días de los meses del año, indicado anteriormente, con un intervalo horario y después se combinan todas los mapas resultando un mapa total de sombras anual.

El proceso de elaboración de este criterio se ve con la necesidad de aplicar unos ciertos pasos, que ayudará eficientemente con la obtención del mapa final de sombras (anual):

I. Primer paso:

En el cálculo del sombreado se necesitan datos relativos a la posición del Sol, en la herramienta a utilizar con ArcGis 10.1 están definidos por los ángulos de Azimut y Elevación. Estos valores se adquieren de la tabla de datos de posición solar

proporcionada por el servicio web «SunEarthTools.com» que posteriormente fue organizada en una tabla Excel (formato .xlsx) para un mejor manejo de la misma, colocando el año, el mes, el día y la hora (con intervalo de 2 horas) correspondientes a los meses indicados del año 2015, con sus respectivos valores de Azimut y Elevación del Sol, expresado en grados.

Se realizaron cuatro tablas por separado para la evaluación de cada mes a utilizar (las tablas se podrán visualizar en el apéndice del trabajo, de los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre), las cuales se importan con el formato de una tabla de atributos de ArcGis (.dbf).

Posición_Sol_Marzo						
OBJECTID *	Anual	Mes	Dia	Hora	ELEVACION	AZIMUT
1	2015	3	1	8	3,49	87,2
2	2015	3	1	10	32,36	92,74
3	2015	3	1	12	59,27	103,79
4	2015	3	1	14	71,31	228,65
5	2015	3	1	16	50,77	263,17
6	2015	3	1	18	22,83	270,17
7	2015	3	2	8	3,62	87,57
8	2015	3	2	10	32,52	93,21
9	2015	3	2	12	59,53	104,66
10	2015	3	2	14	71,66	226,63
11	2015	3	2	16	50,9	262,52
12	2015	3	2	18	22,88	269,74
13	2015	3	3	8	3,74	87,94
14	2015	3	3	10	32,68	93,67
15	2015	3	3	12	59,79	105,51

Figura 53. Tabla de posición del Sol con formato de tabla de atributos de ArcGis (.dbf)

II. Segundo paso:

Para calcular todos los mapas de sombras se crea un submodelo, utilizando un iterador de filas que recorre la tabla y extrae de cada fila los valores de azimut y elevación de la posición del Sol para crear los mapas de sombras necesarios.

Con el uso de la herramienta ModelBuilder se utiliza un iterador de filas «Iterate Row Selection», esta herramienta crea una vista de tabla para seleccionar un

registro y establece dos salidas: filas seleccionadas y valor. En estas filas seleccionadas se escogen los campos restrictivos que pasarán a ser el nombre del campo para guardar los valores que en realidad se disponen y serán utilizados como entrada en otra herramienta de geoprocésamiento, en este caso «Get Field Value» obtener valor de campo, el cual acepta una vista de tabla como valores de entrada, se obtiene el valor de la primera fila de una tabla para el campo especificado (el valor de salida de un iterador) y este valor se le asigna el tipo de dato de salida, en este caso el valor de dato de salida que se ha utilizado son datos decimales «Decimate», esta herramienta coleccionará un sólo valor, por lo cual se manejan dos, uno para obtener el valor de azimut y otro para el valor de elevación; los cuales serán manipulados por la herramienta de «Hillshade» (sombra), el cual arroja un mapa de sombra con la posición del sol específica, tomando en cuenta la iluminación y la sombra proyectada en el raster generado, utilizando como dato base el modelo digital de superficie (MDS); por último cada uno de estos mapas se reclasificarán usando la herramienta de «Reclassify». Estos raster obtenidos se almacenan en carpetas de salida geodatabase (.gdb). Cabe destacar que este procedimiento se emplea para cada uno de los meses del año indicados anteriormente.

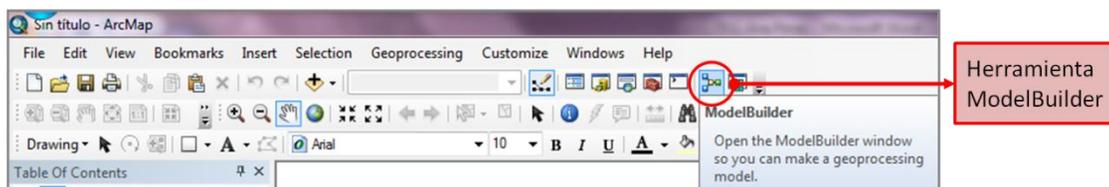


Figura 54. Herramienta ModelBuilder. Abre una ventana para realizar modelos de geoprocésamientos

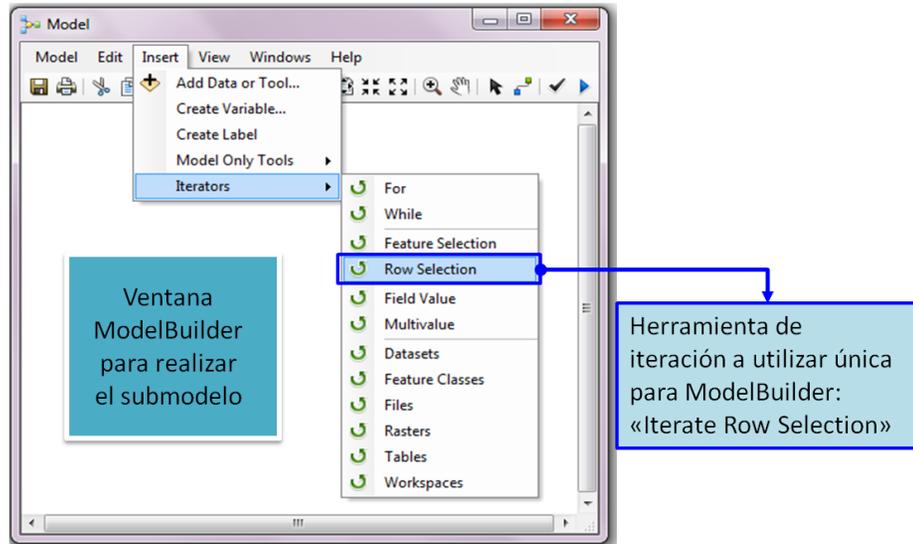


Figura 55. Ventana de ModelBuilder. Herramienta de iteración de selección de filas

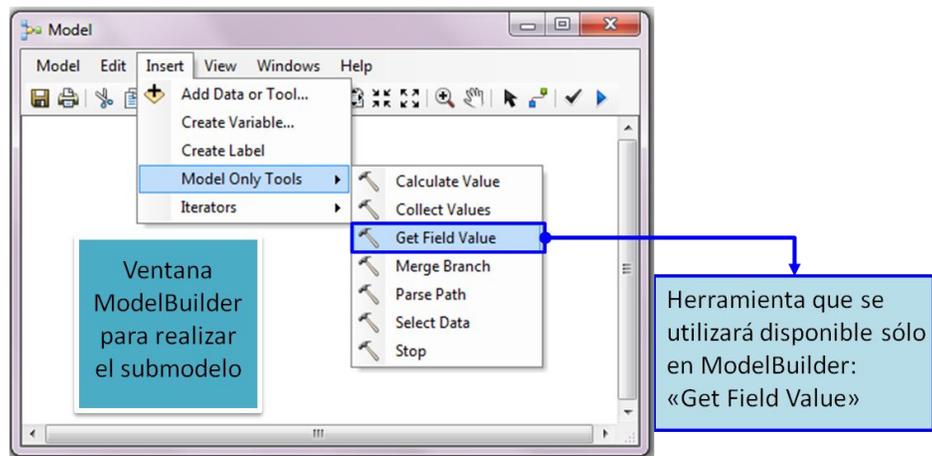


Figura 56. Herramienta sólo disponible en la ventana de ModelBuilder. Herramienta Obtener un valor del campo

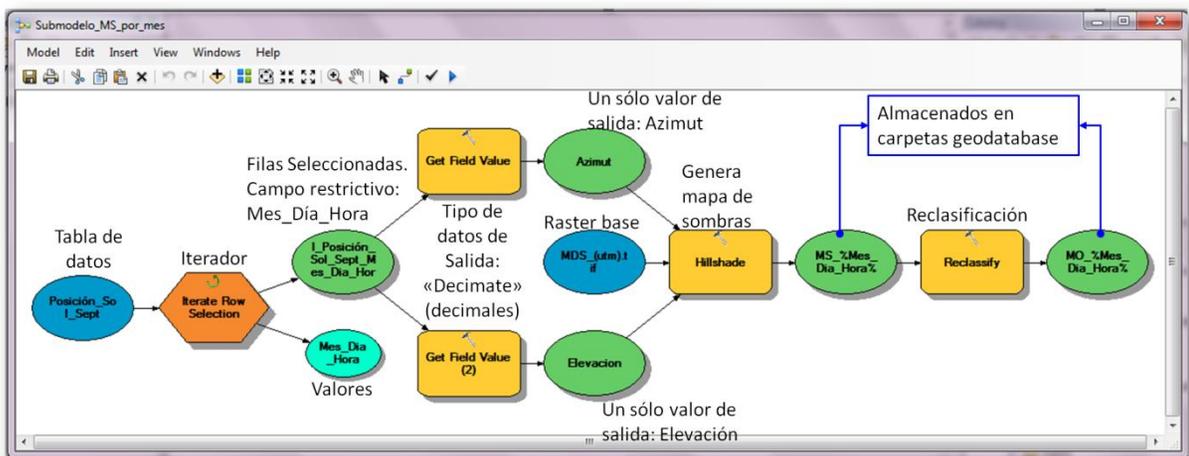


Figura 57. Submodelo para el cálculo de los mapas de sombra a través de un iterador

En las capas raster generadas, los valores de sombra e iluminación resultantes van de 0 a 255 donde las zonas en sombra se corresponden con el valor 0. Como sólo nos interesan las áreas sombreadas y para facilitar las operaciones del cálculo del mapa total posterior, los valores de 1 a 255 de cada mapa se reclasifican como 1. En los mapas obtenidos el valor 0 representa las zonas afectadas por sombras y valor 1 las zonas sin sombra.

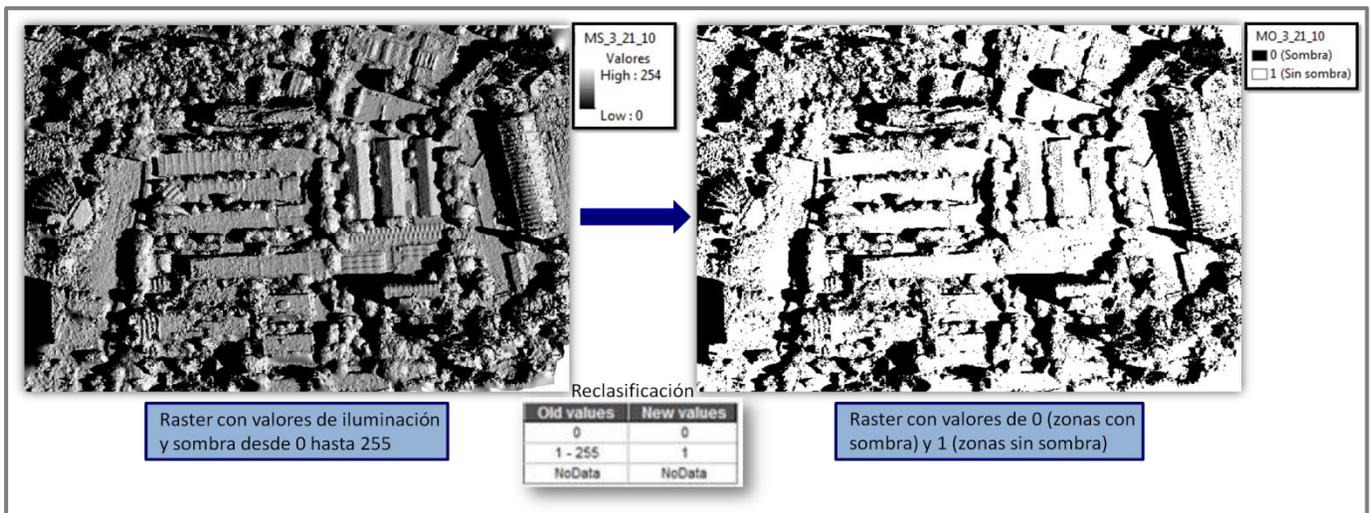


Figura 58. Generación del mapa de sombras (21 de Marzo de 2015 a las 10:00 h)
Fuente: Elaboración Propia.

III. Tercer paso:

Una vez generado los mapas individuales de sombra, resultado del submodelo aplicado anteriormente, éstos se suman de manera ponderada para controlar con mayor eficacia la calidad del producto final, el mapa total de sombra a lo largo del año. Para poder realizar esta operación se ha creado un submodelo, donde se utiliza la herramienta «Weighted Sum» (Sumatoria Ponderada), la cual ofrece la posibilidad de ponderar y combinar fácilmente varias entradas de raster, que representa varios factores al incorporar pesos, logrando crear un análisis integrado.

La herramienta Suma ponderada multiplica los valores de campo designados para cada raster de entrada por el peso especificado. Después, suma (agrega) todos los raster de entrada para crear un raster de salida; es decir los valores de celda de cada raster de entrada se multiplica por el peso asignado, los valores de celda resultantes se agregan (suman) para producir el raster de salida final.

Se procede a sumar los mapas de sombras reclasificados de cada uno de los meses pautados como evaluación para el criterio, a éstos se les asignará un valor ponderado igual a la unidad. Luego de crear el submodelo que me genere los mapas individuales de sombra por los cuatro meses que se evalúan, se realiza la misma operación anterior con los cuatro raster obtenidos, pero con la diferencia de que a éstos se les atribuye un valor ponderado, el cual será la radiación global solar media que existe en el mes convenido de la zona de estudio, este dato se obtiene previamente gracias al Departamento de Hidrometeorología de la UCV, datos promediados a lo largo de 22 años; éstos valores son los siguientes:

- Marzo: 6,17 kwh/m²
- Junio: 4, 87 kwh/m²
- Septiembre: 5,32 kwh/m²

- Diciembre: 5,77 kwh/m²

Luego de obtener este mapa de sombra final, utilizando el dato de radiación para ponderar, se procede a llevar los raster a datos con números enteros con la herramienta «Raster Calculator» (calculadora raster), obteniendo un raster de salida con valores enteros. Posteriormente, el mapa generado con valores enteros se reclasifica, asignando valor 0 a las zonas con sombra y valor 1 a las zonas sin sombra.

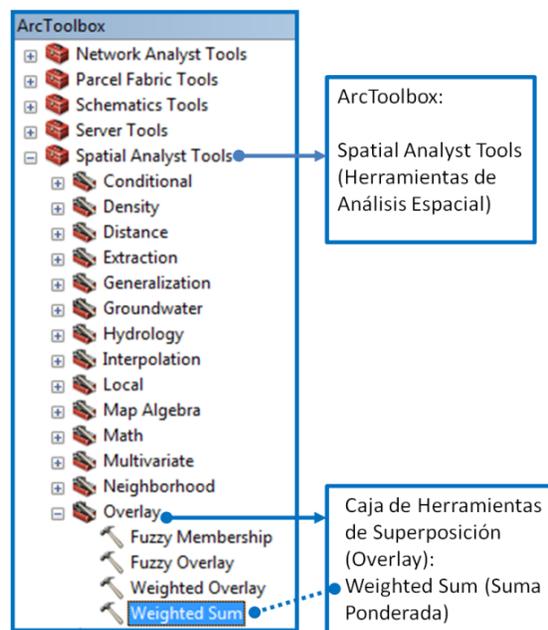


Figura 59. Herramientas de Superposición: Suma Ponderadas para modelos raster en ArcGis 10.1

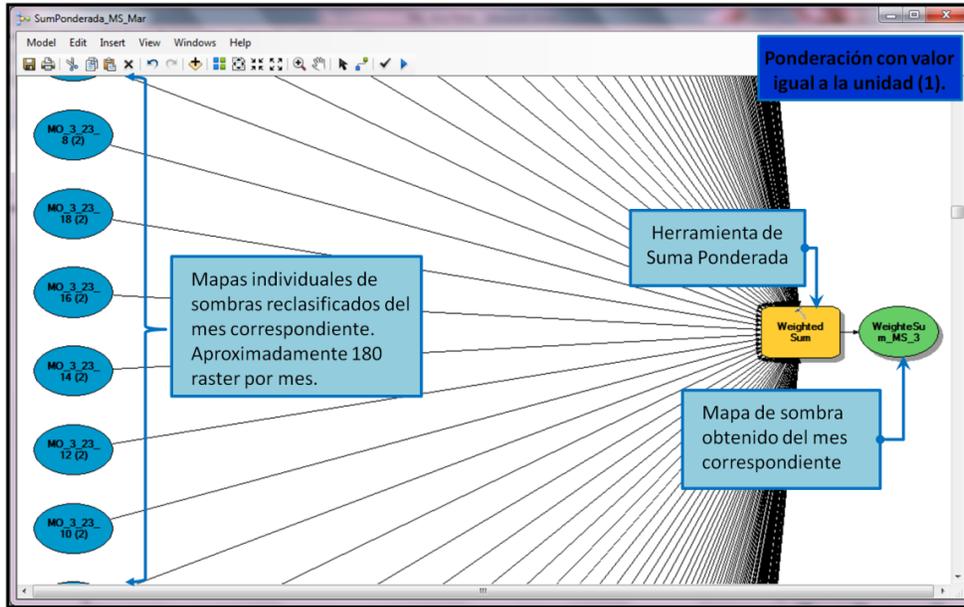


Figura 60. Submodelo que calcula el mapa de sombras por mes. (Peso igual a la unidad)

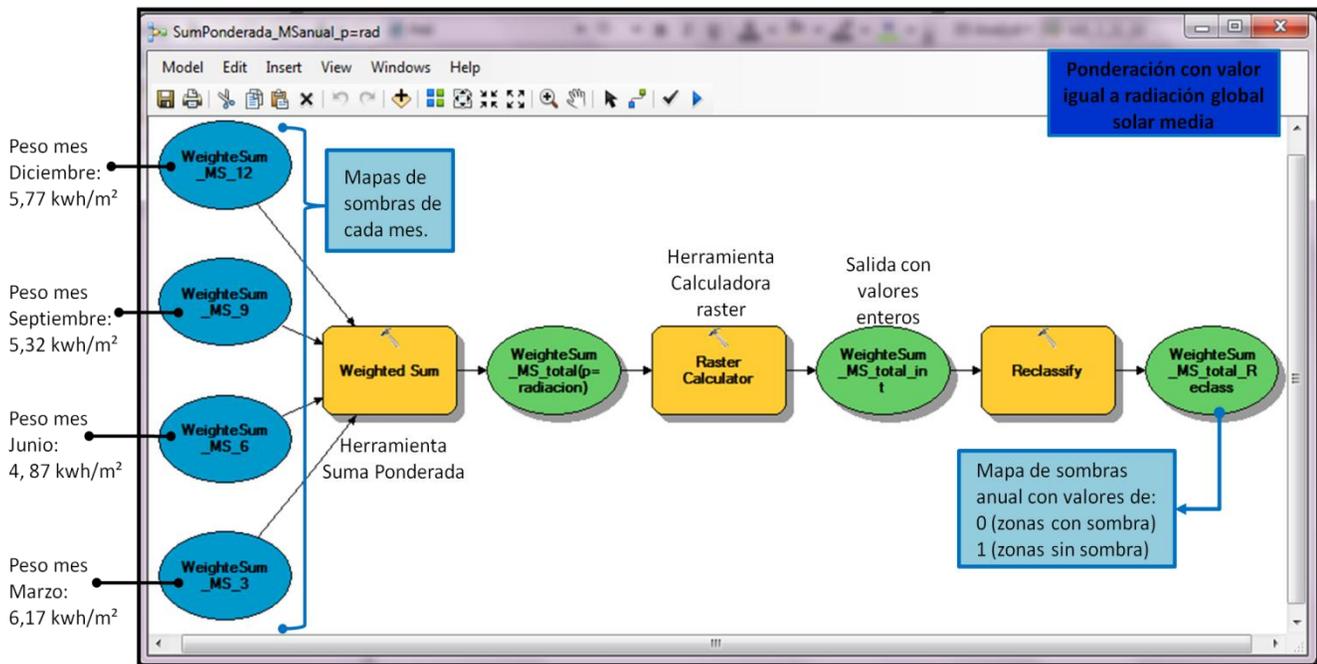
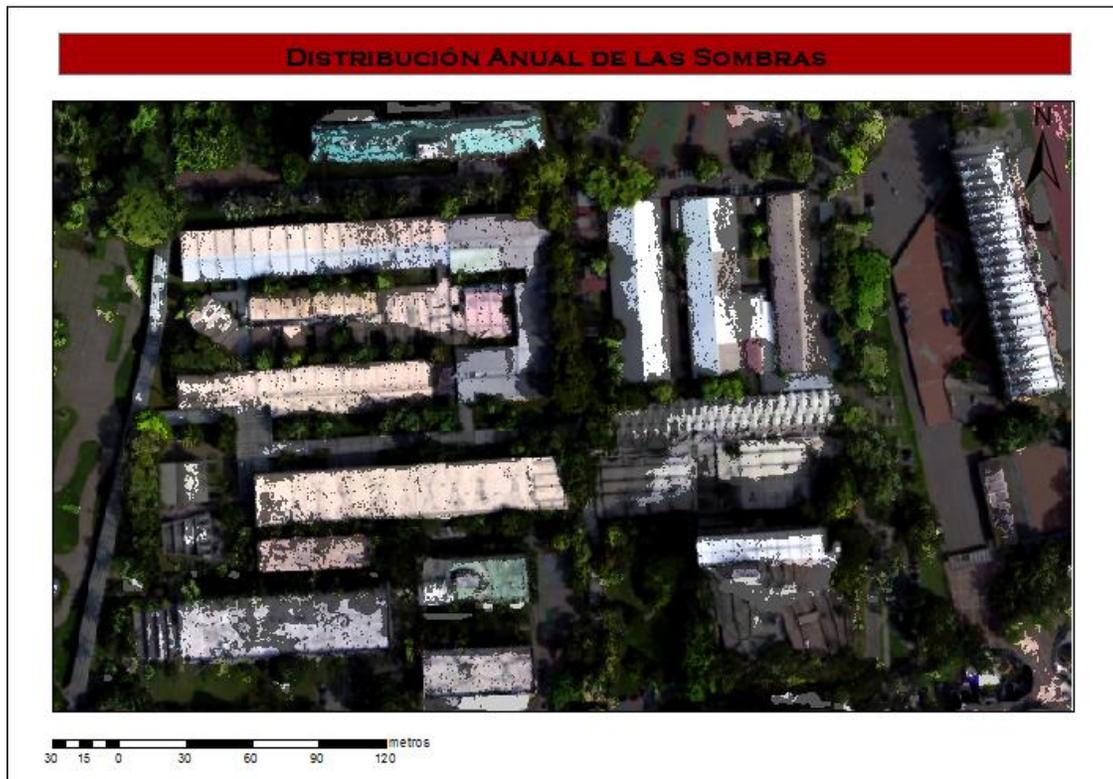


Figura 61. Submodelo que calcula el mapa de sombras anual. (Peso igual a la radiación global solar)

En la imagen que sigue se muestra el mapa de las sombras anuales resultantes, utilizando el mapa de sombras anual reclasificado junto con la ortofoto, para así obtener las zonas de sombras del lugar de estudio a través del año:



Mapa 8. Distribución Anual de las Sombras en la zona de estudio

Fuente: Elaboración Propia.

La posición del Sol, además de cambiar cada día a lo largo del año solar (por ejemplo, la altura del Sol es más baja en invierno y más alta en verano), es diferente según la situación geográfica desde donde se mida. A continuación se muestra cómo evoluciona el tamaño de las zonas cubiertas por sombras en los diferentes meses del año, manejados en el presente trabajo.



Figura 62. Distribución de las sombras en el lugar de los meses correspondientes



Figura 63. Distribución de las sombras en los techos de los meses correspondientes. Sombras representadas con color magenta

IV. Cuarto paso:

Finalmente se delimita la superficie de las sombras que sólo afectan a los edificios con la máscara de los polígonos de los techos. El resultado es el mapa de sombras anual en las horas centrales del día.



Mapa 9. Superficie de las Edificaciones afectadas por sombras

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.5 Accesibilidad a los techos para mantenimiento de arreglos fotovoltaicos

La accesibilidad a la zona de los techos donde se sitúan los arreglos también es un factor a considerar para establecer la superficie efectiva. Estas zonas

principalmente deben facilitar el mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos y el acceso para la extinción de incendios.

Con estas zonas se establecen unos requisitos que *“básicamente se pueden resumir en dos caminos de acceso de 1 m de ancho en techos inclinados y una banda perimetral de al menos 1 m en cubiertas planas. En los dos tipos de cubiertas debe dejarse un espacio de al menos 1 m de ancho alrededor de chimeneas, aires acondicionados, extractores, etc.”* (Amador, J.).

En este caso con la herramienta «Buffer» que crea polígonos de zona de influencia alrededor de entidades de entrada a una distancia especificada, se utiliza sobre la capa de contorno de los techos (polilíneas) se delimitará únicamente una zona de 1 metro de ancho alrededor de la polilínea del contorno de los techos creándose una capa externa a las mismas, se obtiene una capa de polígono de 1 metro que rodea al contorno de los techos, pero no es lo ideal ya que se observa un polígono de 2 metros en total; para conseguir lo que necesitamos se utiliza la herramienta «Clip», que extrae la parte que interesa de las entidades de entrada que se superponen a las entidades que se usan como molde para recortar, con ésta herramienta se busca tener sólo la zona interna de la polilínea del contorno de los techos de distancia de 1 metro, se logra utilizando la capa de techos (polígonos) que ayuda a extraer la capa de interés, una vez ya realizado este procedimiento se obtiene la zona de accesibilidad a los techos, como siguiente paso se tiene que unir ésta capa de zona de accesibilidad de 1 metro de distancia junto con la capa de techos (polígonos), para ello se aplica la herramienta llamada «Union», creando una capa que muestra en conjunto el área de acceso a los techos de distancia 1 metro y el área que queda disponible en los techos de las edificaciones. Finalmente, el resultado obtenido se lleva a una capa raster para utilizarlo en un procedimiento posterior; para ello se usa la herramienta «Feature to raster», que convierte las entidades (shapefile) de polígono a dataset

raster, indicando el campo de la tabla de atributos del dataset de entidades de entrada que se utilizará para asignar los valores al raster de salida, el tamaño de celda para el raster de salida y el formato del mismo (en este caso archivo TIFF). Como los accesos son zonas que se han de eliminar de la superficie total de los techos, y se asigna valor 1 a las celdas que se sitúan fuera de estas zonas.

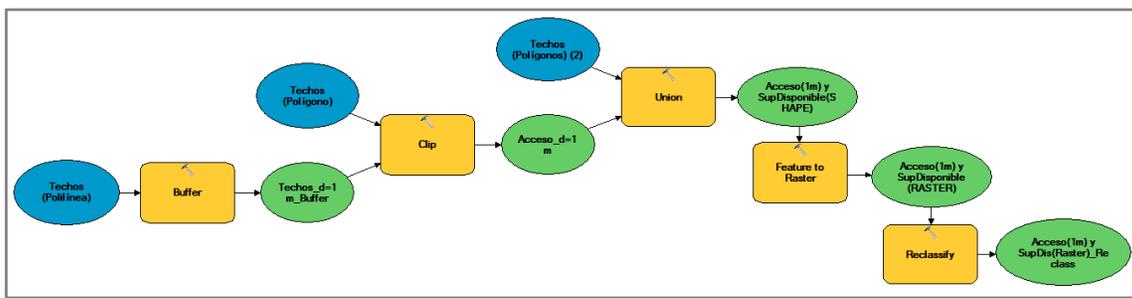


Figura 64. Modelo para delimitar accesibilidad a los techos

A continuación, se presenta en escala 1:800 parte de la zona de estudio con el objetivo de mostrar el progreso del procedimiento según los pasos descritos anteriormente, y así obtener una mejor comprensión de la elaboración del criterio que será evaluado posteriormente.

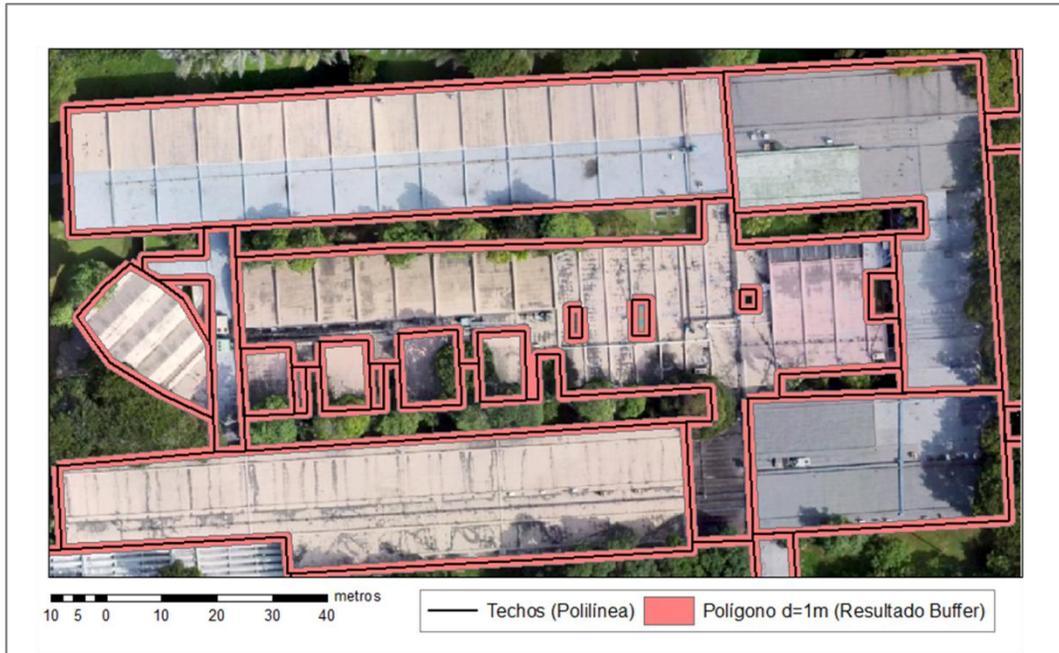


Figura 65. Generación de la zona de influencia alrededor de la polilínea



Figura 66. Extracción de la parte que interesa (zona interna del contorno de los techos con distancia de 1m). Generación del polígono de accesos a techos

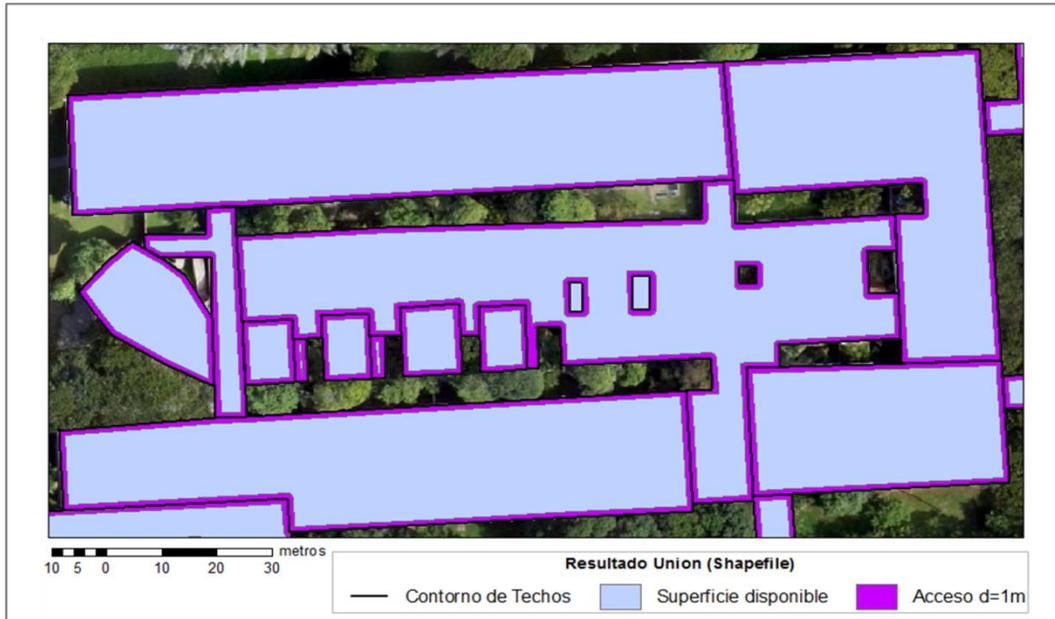


Figura 67. Obtención del polígono de accesibilidad a los techos. Se visualiza el acceso de 1m de distancia en conjunto con la superficie disponible para la colocación de los paneles fotovoltaicos

Posteriormente al resultado de accesibilidad se convierte de polígono a raster y éste es luego reclasificado para su manejo en otros procedimientos, en el siguiente gráfico se muestra la generación del mapa de accesibilidad a la superficie de techos, siendo 0 el área de la superficie de acceso y 1 el área disponible para los paneles.



Mapa 10. Delimitación de la accesibilidad en los techos para el mantenimiento de arreglos fotovoltaicos

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.6 Monumentos, edificios singulares y techos que no correspondan a edificios

En todas las áreas urbanas se localizan monumentos y edificios que por sus características o importancia histórica no son adecuados para la instalación de sistemas fotovoltaicos.

En nuestro caso, no se observa en la zona de estudio seleccionada de la U.C.V. de la Ciudad Universitaria ningún monumento o edificio singular que haya que tener en cuenta en el análisis, sin embargo se consideran los techos que no corresponden a edificaciones, como son techos de pasillos, de gradas y de pequeños sitios de venta donde su techo no es estable para la colocación de paneles fotovoltaicos. De esta forma, una vez identificados los techos de edificios de interés y los techos no correspondientes a edificios, se genera un raster que refleja la situación de los mismos, donde se excluyen los techos no aptos para la instalación de sistemas fotovoltaicos.

El procedimiento a seguir es sencillo, teniendo capas de entidades de los techos no aptos y la superficie de las edificaciones, se unen con la herramienta «Identity», la cual opera de la siguiente forma: la entidad de entrada (en este caso «superficie de las edificaciones») que se superponga a la entidad de identidad (en este caso «techos no aptos») obtiene los atributos de la misma. Luego el resultado que se obtiene se convierte de polígono a raster con la herramienta «Feature to Raster»; y como último paso este raster se reclasifica, asignando valor 0 a los techos no pertenecientes a edificios y valor 1 a la superficie de edificios que son aptos para este tipo de instalaciones de arreglos fotovoltaicos.

A continuación se muestra el modelo que se utilizó en ArcGis 10.1 para determinar el raster de las superficies de infraestructura inadecuada y también el mapa obtenido con éste modelo, que se utiliza como criterio de descarte en un posterior procedimiento.

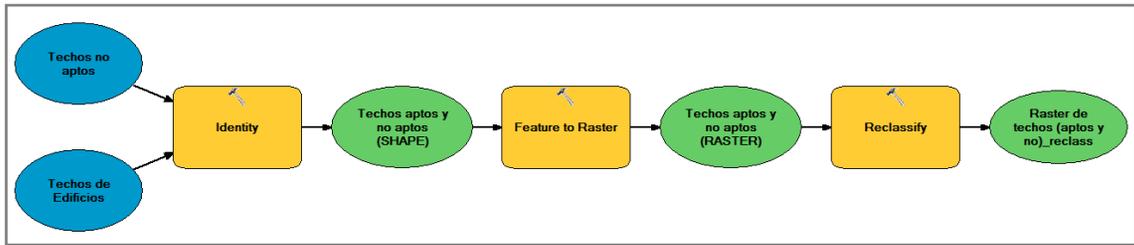
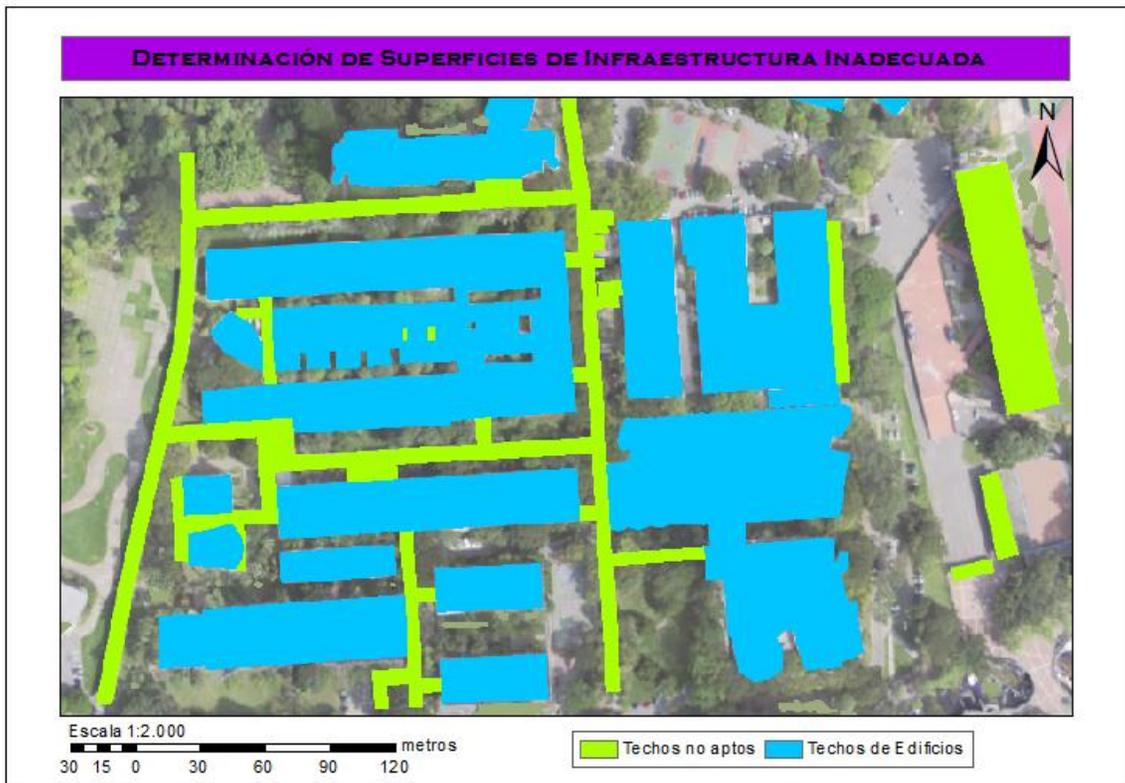


Figura 68. Modelo para determinar las superficies de infraestructura inadecuada



Mapa 11. Determinación de las superficies adecuadas para la instalación de arreglos fotovoltaicos (edificios)

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.7 Cálculo de superficies de los techos disponibles

En la caracterización de la superficie de techos se analiza tanto la superficie útil total como la correspondiente a cada edificio apropiada para sistemas fotovoltaicos.

3.4.7.1 Superficie total de techos útil

Una vez que las capas binarias con las restricciones han sido generadas, la superficie de techos disponible y efectiva se determina superponiéndolas, utilizando las herramientas, mencionadas con anterioridad, disponibles en ArcGis 10.1 relacionadas con la superposición de raster, éstas se pueden encontrar en el módulo «Spatyal Analyst» caja de herramientas «Overlay», en este caso se utilizó la herramienta «Fuzzy Overlay» (Superposición Borrosa) el cual requiere de la reclasificación de las capas de forma binaria, se utiliza el método de «*And* o *Product*», ambos métodos funcionan, obteniéndose como resultado una capa raster con aquellas localizaciones de techos que cumplen todas las condiciones:

- Superficies con la inclinación adecuada e idónea para la instalación de los paneles fotovoltaicos.
- Superficies orientadas hacia donde se proyecta el sol en su constante movimiento anual según el hemisferio que nos corresponde (Norte), orientación ideal Sur, Sureste y Suroeste.
- Superficie sin sombras en horas centrales del día a lo largo del año.
- Zonas del techo no destinadas al acceso a los arreglos fotovoltaicos.
- Los techos que corresponden a edificios que a su vez no están clasificados como monumentos o edificios singulares.

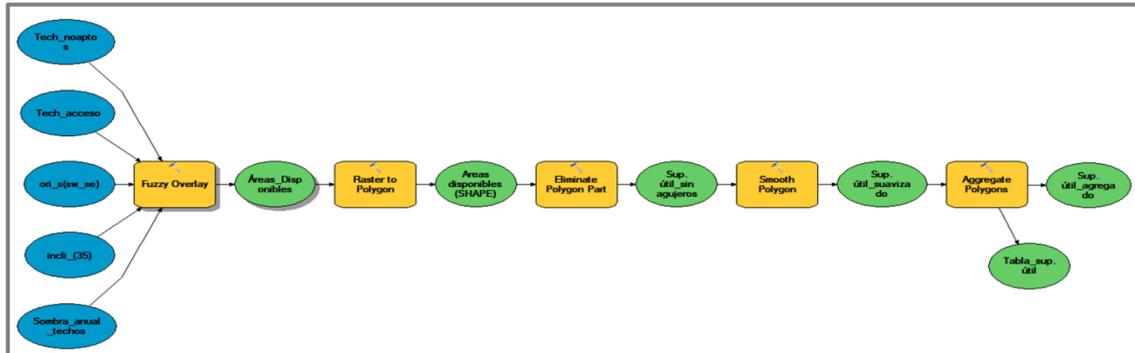
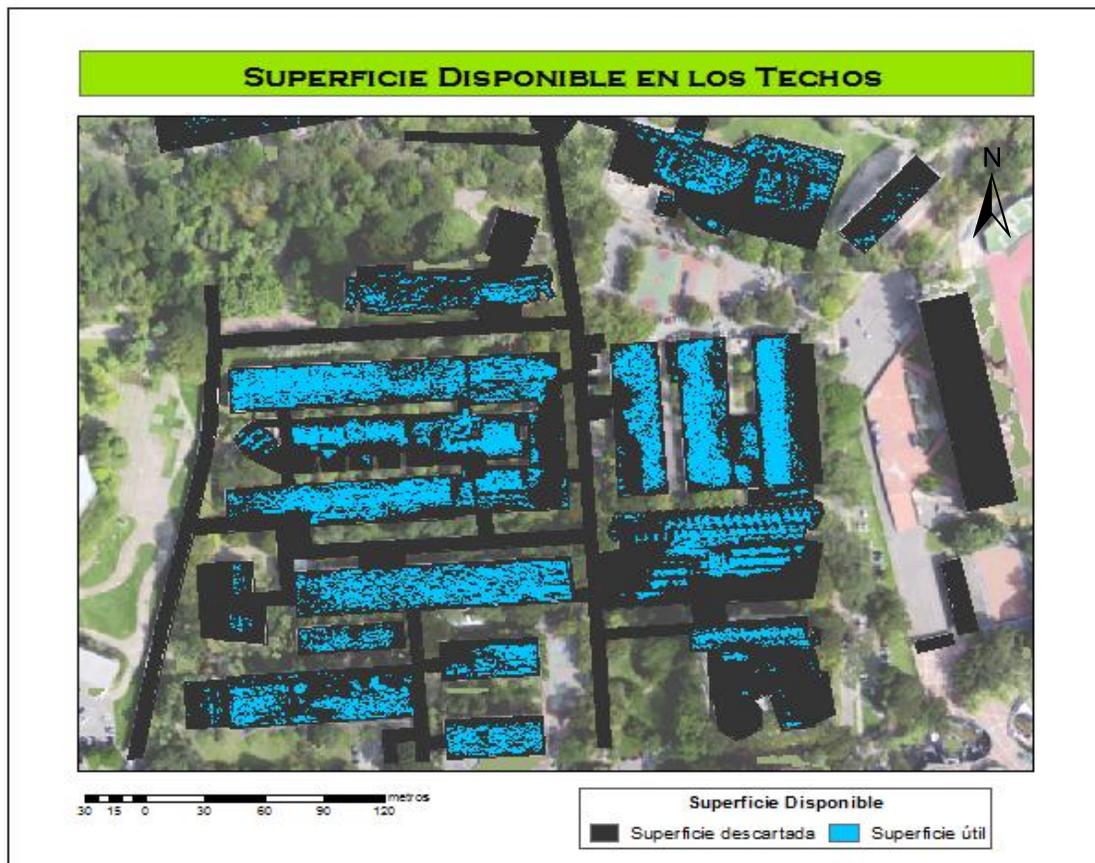


Figura 69. Modelo para calcular superficie de los techos



Mapa 12. Techos Disponibles para la instalación de arreglos fotovoltaicos. (Capa raster)

Fuente: Elaboración Propia.

Luego de obtener la capa raster con las zonas disponibles se genera una capa de polígonos, en ésta se debe realizar una depuración para obtener el área total por techo en la zona disponible, para ello se realizan ciertos procedimientos con diversas herramientas de ArcGis que ayudan a facilitar la obtención final del producto. La edición de la capa de polígono consta de unos pocos pasos, que se describen a continuación:

- Primero, con la capa shape generada se dejan sólo los polígonos de interés a trabajar, que es la zona disponible, eliminando aquellos que representen la capa no disponible para instalaciones fotovoltaicas.
- Luego se utiliza una herramienta llamada «Eliminate Polygon Part» (eliminar parte de polígonos) en administración de datos. Esta herramienta crea una clase de entidad de salida que contiene los polígonos de entrada con algunas partes de agujeros de un tamaño especificado que se eliminó, ya que los agujeros en polígono se consideran parte del polígono, se pueden eliminar o rellenar con ésta herramienta, para ello se especifica una dimensión determinada y si el tamaño del agujero resulta ser más pequeño que el que se especificó, éste se eliminará y rellenará en la salida.
- Con este resultado obtenido, utilizamos la herramienta «Smooth Polygon» para suavizar los ángulos cerrados en contornos de polígonos para mejorar la calidad estética y cartográfica; en la herramienta existen dos métodos de suavizado, en éste caso se utilizó el método PAEK Polynomial Approximation with Exponential Kernel (Aproximación polinomial con núcleo exponencial) suaviza los polígonos en función de una tolerancia de suavizado. Cada polígono suavizado puede tener más vértices que el polígono de origen. El parámetro tolerancia del suavizado controla la longitud de una ruta "en movimiento" que se utiliza para calcular los nuevos

vértices. Cuanto menor sea la longitud, más detalles se preservarán. En conclusión en este paso se calcula un polígono suavizado utilizando un método que no pasará a través de los vértices del polígono de entrada conservando mayor detalle debido la corta longitud mejorando la calidad del producto final.

- La capa de polígono que resulta se debe seguir mejorando, para ello se aplica la herramienta que ayudará a tener un producto de mayor calidad, ésta se llama «Aggregate Polygons» (agregar polígonos), la cual combina los polígonos dentro de una determinada distancia entre sí para formar nuevos polígonos, en ésta herramienta se debe especificar una distancia que se aplica entre los límites del polígono eligiendo la unidad preferida, también se determina un área mínima junto con su unidad para un polígono agregado que se retendrá, el valor predeterminado es cero y por último se especifica la característica de las entidades de salida al construir los límites agregados, en este caso se utilizó la opción Non-Orthogonal (no ortogonal) que produce resultados formados orgánicamente.
- Para finalizar la limpieza y refinación de la zona disponible en techos, es necesario que con la capa que se obtuvo en el paso anterior se calcule el área de los polígonos que fueron generados. Con la tabla de atributos que posee el shapefile, se crea un campo con el nombre «área», se selecciona la fila y en el menú de opciones aparece «Calculate Geometry...» la cual calcula valores geométricos determinados en cada polígono, en este caso se calcula el área de los polígonos identificados en la tabla de atributos especificando la unidad preferida (m²) y el sistema de coordenadas, se generará automáticamente el valor de área; luego se seleccionan los polígonos de menor área y se eliminan. Se realiza este paso debido a que posterior a la depuración aún quedan ciertas áreas de un tamaño muy

reducido que no resultan viables como área disponible para la colocación de paneles fotovoltaicos, aproximadamente se eliminan las área menores a 50 metros cuadrados.

A continuación se muestra gráficamente a una escala 1:500 los resultados que se fueron obteniendo con los pasos descritos anteriormente, para lograr una mejor comprensión de la depuración del área disponible que se obtuvo con la superposición.

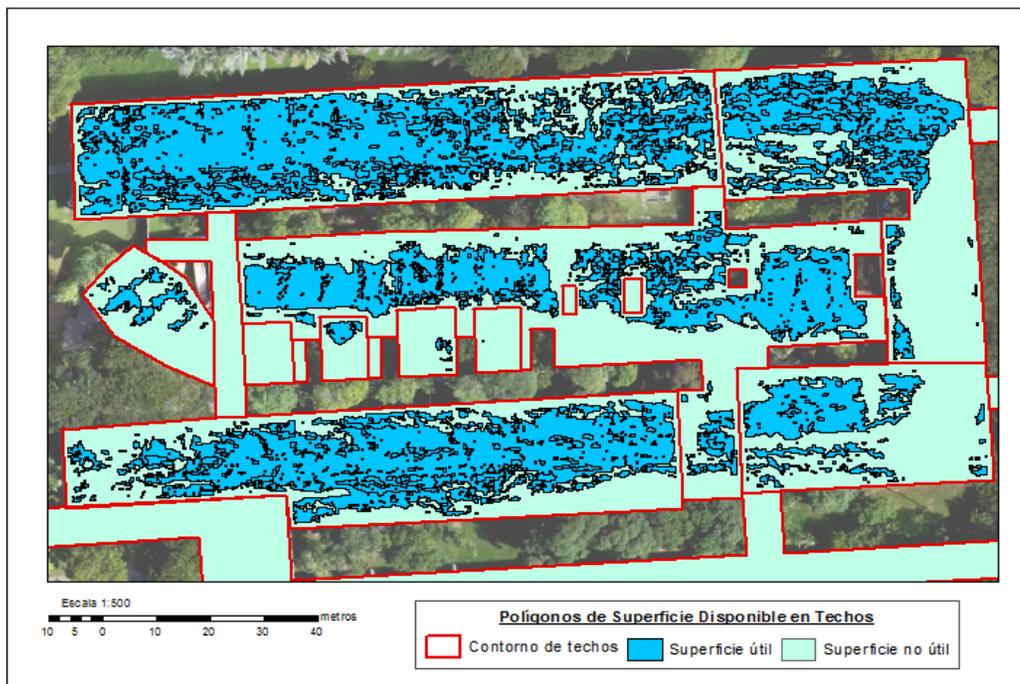


Figura 70. Capa de polígonos generada de la superficie disponible en techos a partir de la capa raster obtenida de la superposición

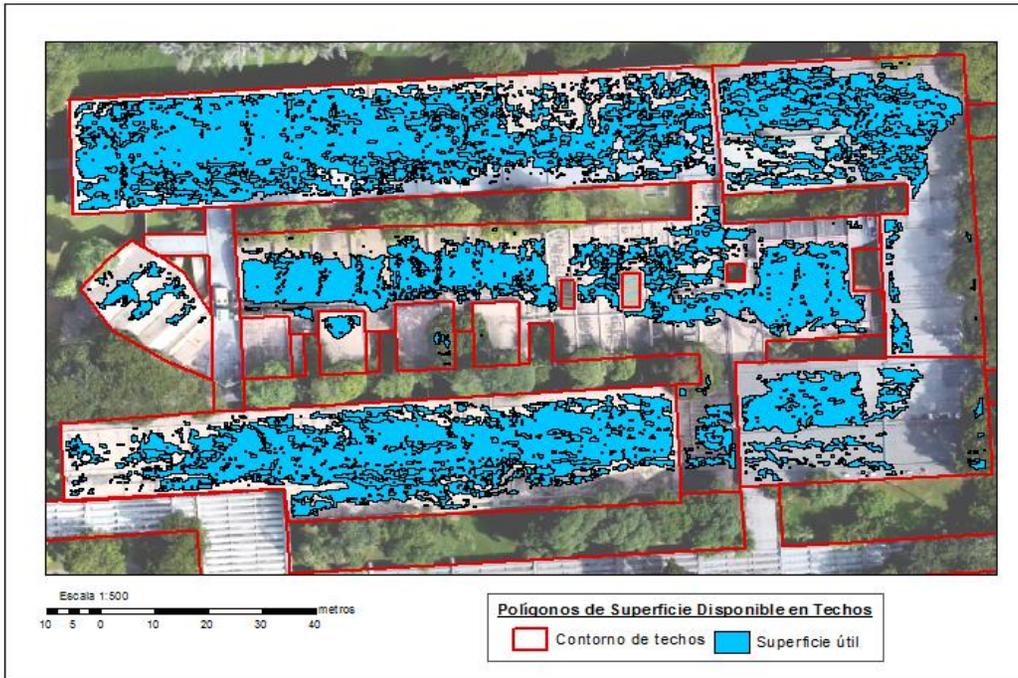


Figura 71. Paso 1: Eliminación de la capa de polígonos que no represente la superficie útil

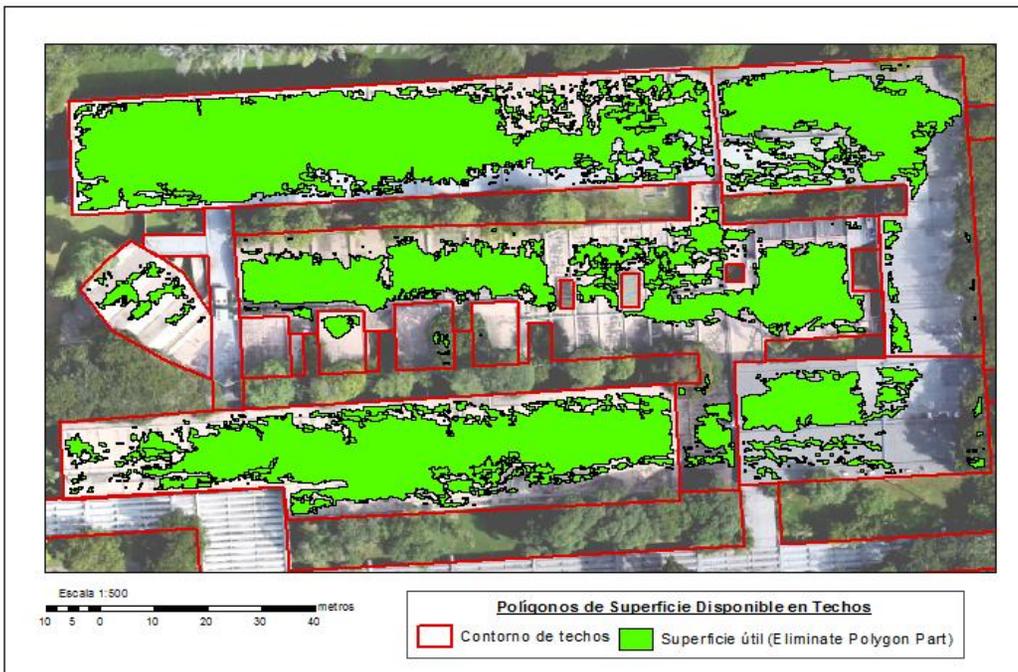


Figura 72. Paso 2: Eliminación y relleno de partes de agujeros de polígonos para crear una entidad (polígono) más consistente.

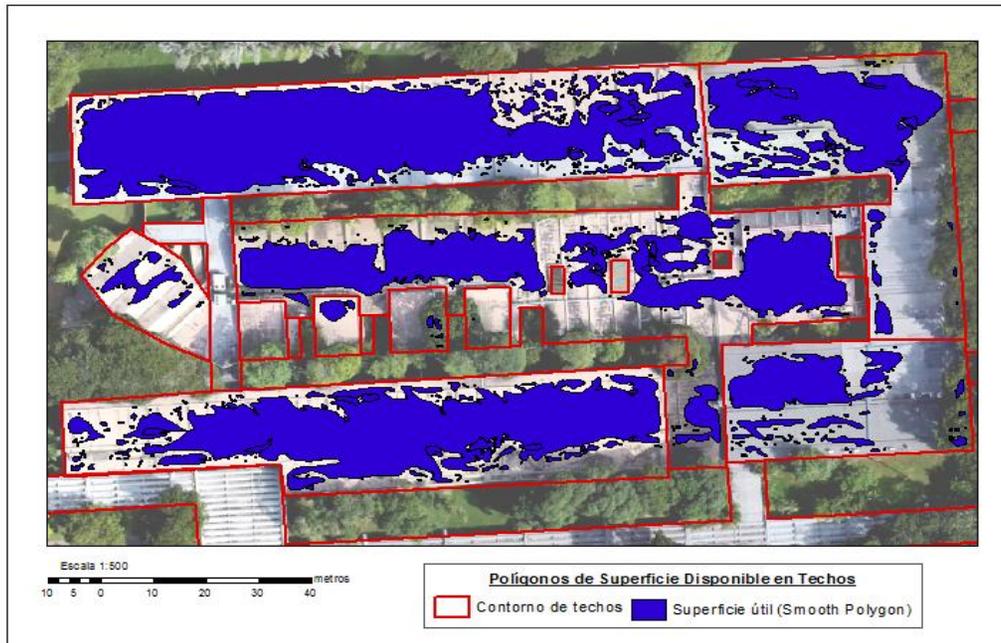


Figura 73. Paso 3: Suavizado de polígonos utilizando el método PAEK (Aproximación polinomial con núcleo exponencial) para mejorar la calidad estética y cartográfica

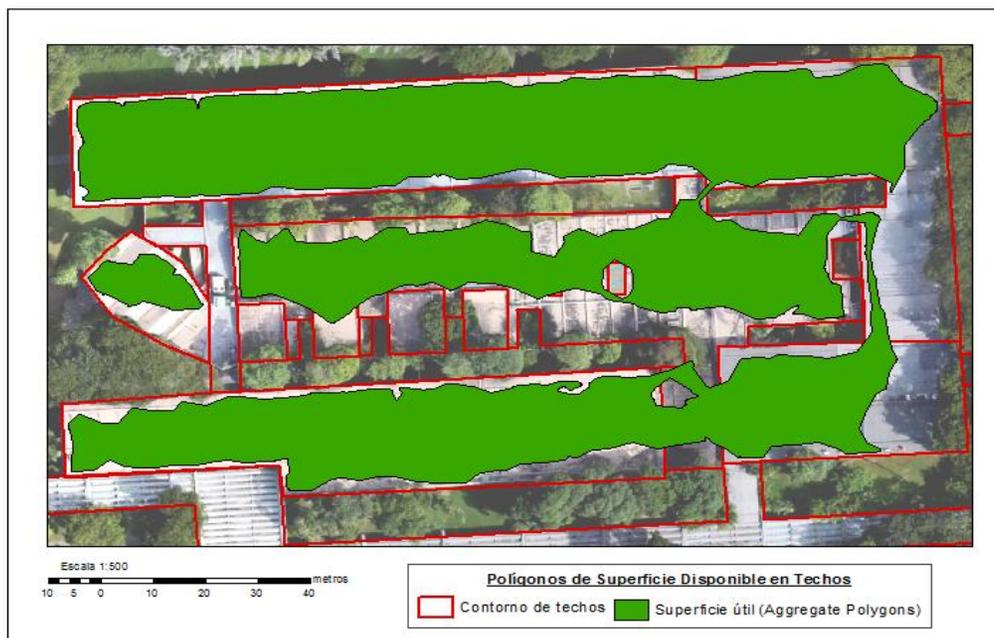


Figura 74. Paso 4: Se combinan los polígonos entre sí determinando una distancia específica para formar nuevos polígonos utilizando la opción no ortogonal que genera una forma más armónica

En las figuras que siguen se aprecia la utilización de la tabla de atributos de la capa generada en el paso cuatro para mejorar la limpieza y refinación de la zona disponible en techos.

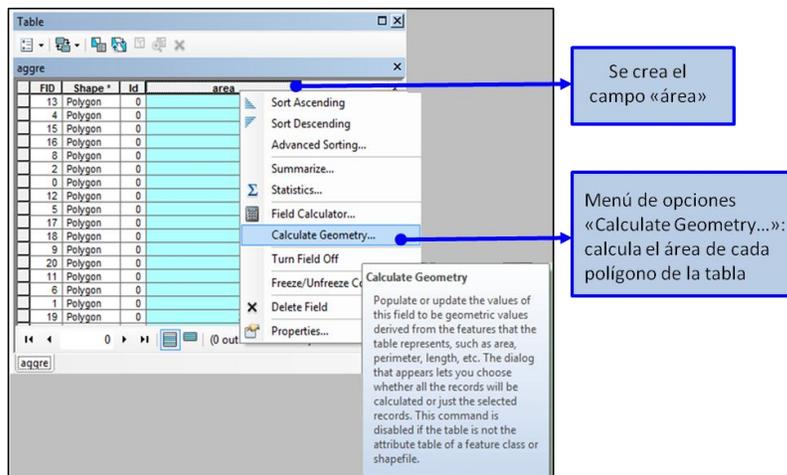


Figura 75. Tabla de atributos en la cual se crea el campo para calcular el área a través del menú de opciones

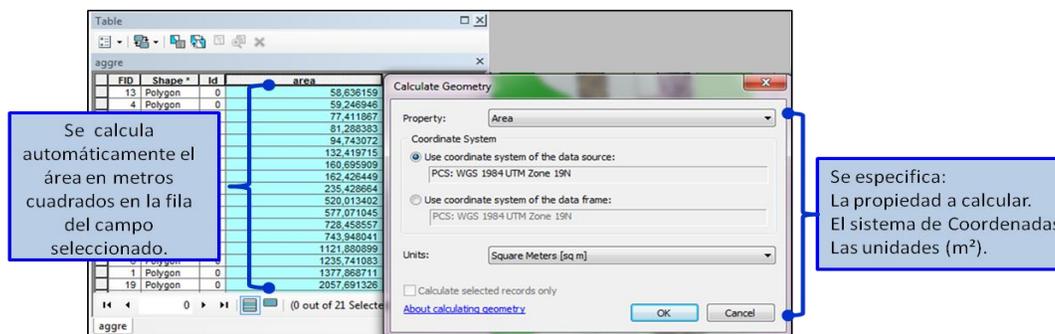
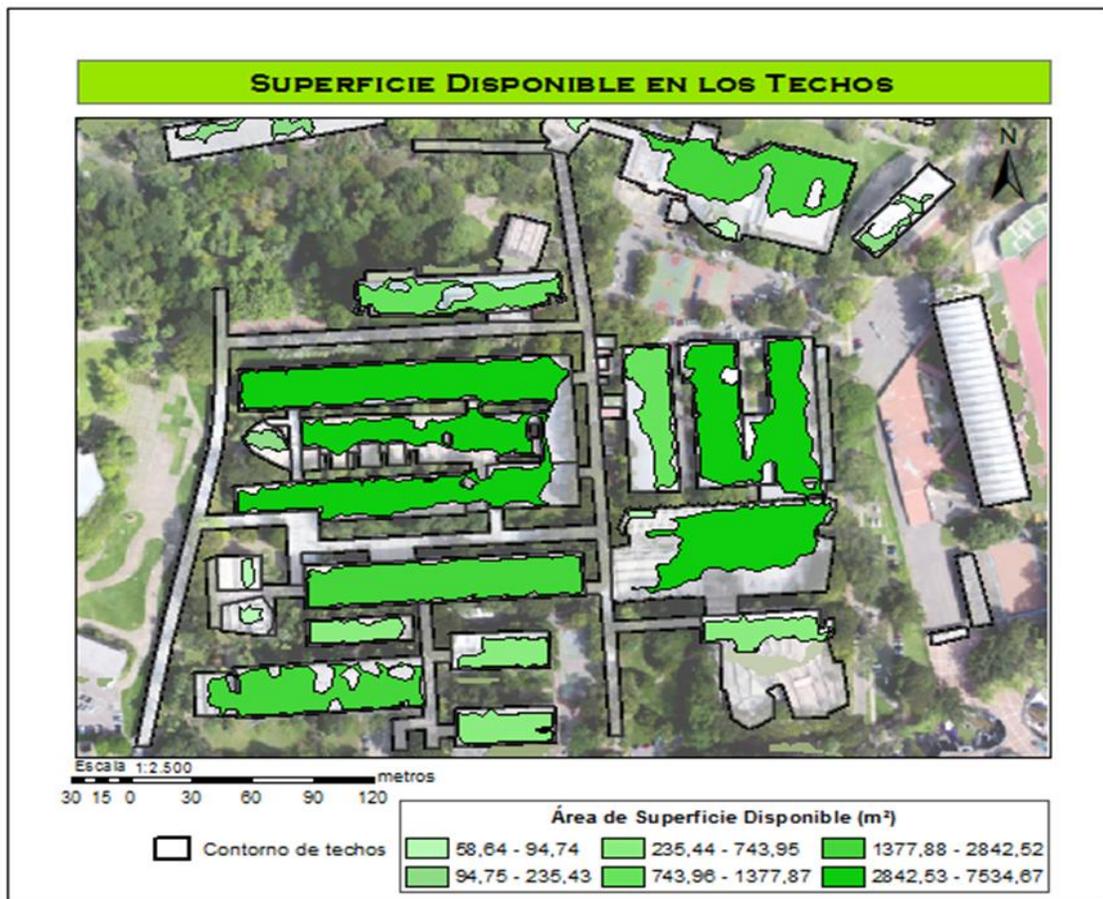


Figura 76. Generación automática del área de los polígonos especificando ciertas condiciones

La posterior figura muestra la tabla de atributos, donde ya se ha eliminado ciertas áreas de un tamaño muy reducido (menores a 50 m²) que no resultan viables como área disponible para la colocación de paneles fotovoltaicos.

FID	Shape *	Id	area
13	Polygon	0	58,636159
4	Polygon	0	59,246946
15	Polygon	0	77,411867
16	Polygon	0	81,286383
8	Polygon	0	94,743072
2	Polygon	0	132,419715
0	Polygon	0	160,695909
12	Polygon	0	162,426449
5	Polygon	0	235,428664
17	Polygon	0	520,013402
18	Polygon	0	577,071045
9	Polygon	0	728,458557
20	Polygon	0	743,948041
11	Polygon	0	1121,880899
6	Polygon	0	1235,741083
1	Polygon	0	1377,868711
19	Polygon	0	2057,691326
3	Polygon	0	2425,839943
14	Polygon	0	2842,518502
10	Polygon	0	6031,843029
7	Polygon	0	7534,671586

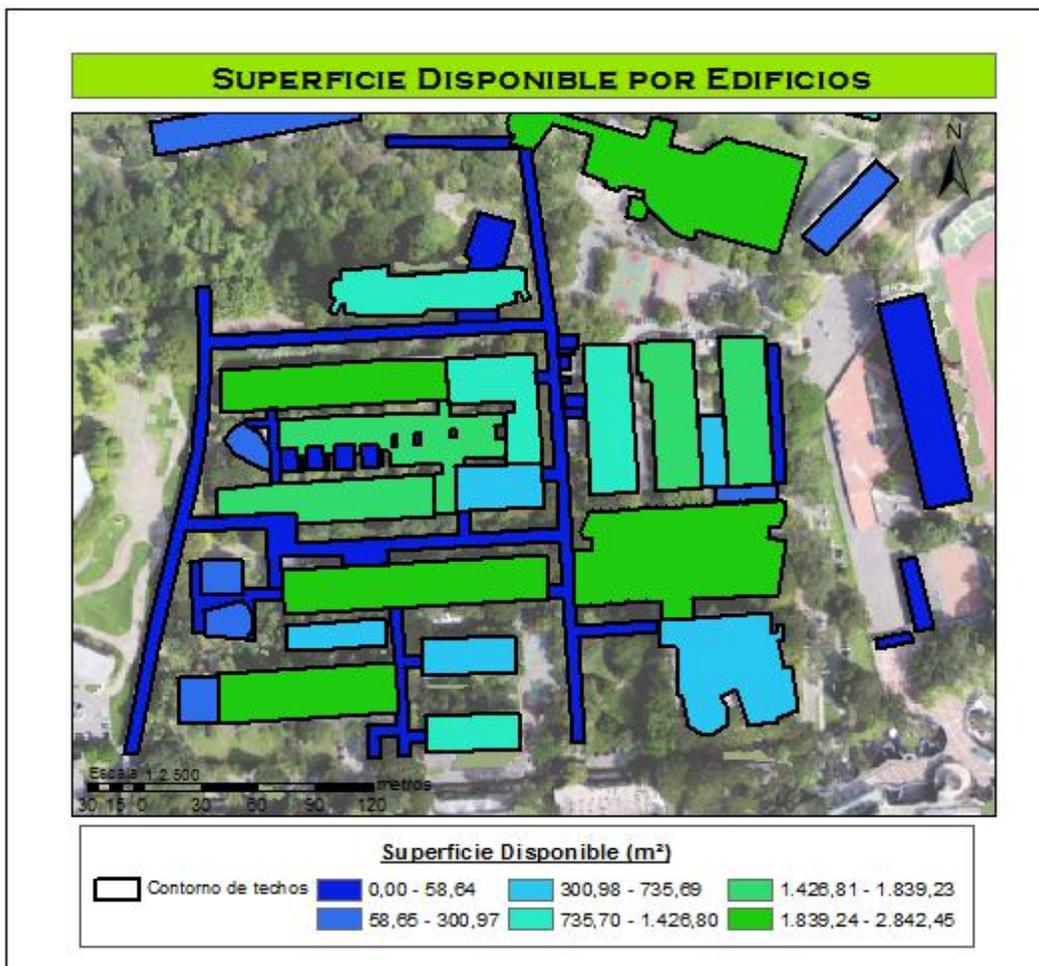
Figura 77. Tabla de atributos de las áreas de los polígonos de Superficie disponible para instalaciones fotovoltaicas



Mapa 13. Áreas de la superficie disponible para la instalación de arreglos fotovoltaicos

Fuente: Elaboración Propia.

Al disponer de una capa de polígonos con el área disponible que cubre la planta de los edificios, se puede definir la superficie de techos útil para instalar módulos en cada uno de ellos; utilizando ciertas herramientas y construyendo una nueva tabla de atributos en un shapefile diferente. Para finalmente obtener la capa raster de la superficie de los edificios indicando el área disponible por techo para la instalación de arreglos fotovoltaicos, se puede apreciar en la imagen que sigue. Esta capa se utilizará en procedimientos adicionales al trabajo.



Mapa 14. Superficie de techos disponibles por edificios para instalaciones fotovoltaicas

Fuente: Elaboración Propia.

3.5 DETERMINACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

En la generación del mapa de radiación solar se utiliza la herramienta «Área de radiación solar» que determina la radiación solar que llega a una superficie en un periodo específico de tiempo. La radiación calculada para un área determinada se da como irradiación global (directa + difusa) en unidades de wh/m^2 y se determina según el MDS. En el análisis solar se tienen en cuenta los cambios en la posición del Sol y el efecto de los edificios o cualquier otro elemento topográfico. Se definen los siguientes parámetros:

- La latitud (en grados y positiva para el hemisferio norte) se utiliza en el cálculo de la declinación y posición solar. Por defecto, su valor es de 45 grados pero como la capa de entrada raster dispone de una referencia espacial, la latitud se calcula forma automática ($10,483^\circ$).
- El periodo de tiempo en el que se determina la radiación solar puede cambiar desde uno a varios días o un año completo. Se ha seleccionado el año 2015.
- Parámetros topográficos como la pendiente y orientación que dependen del modelo de elevación de la zona.
- La proporción difusa de la radiación depende de las condiciones atmosféricas. Su valor varía de 0 a 1, pero en general para cielos despejados un valor adecuado suele ser 0,3.
- La transmitividad se refiere a la relación entre la cantidad de energía recibida en la atmósfera y la que llega finalmente a la superficie del terreno. Por defecto para cielos despejados su valor es de 0,5 aunque los valores oscilan de 0 a 1 (sin transmisión y transmisión completa respectivamente).

Una característica a considerar de esta herramienta es la asignación de una latitud a toda el área de estudio, resultando adecuada para áreas reducidas o como máximo de escala local.

Con esta herramienta obtenemos, con el dato base necesario Modelo Digital de Superficie (MDS), el mapa de Radiación Global de la zona de estudio, los valores de los datos de la radiación global se encuentran en unidades wh/m^2 , se utiliza la herramienta calculadora raster «Raster Calculator» para conseguir las unidades que se necesitan para este tipo de datos que se utilizarán luego dividiendo dichos valores de la capa raster entre 1000, y así obtener el mapa de radiación global solar en unidades de kwh/m^2 . Luego de tener las unidades convenientes en el raster se procede a extraer datos por medio de una máscara con la herramienta «Extract by Mask» utilizando la capa shape de polígonos de techos como máscara; consiguiendo al final un mapa de radiación global observable sólo en los techos, ésta capa raster se utilizará posteriormente para el cálculo de energía producida por los módulos fotovoltaicos.

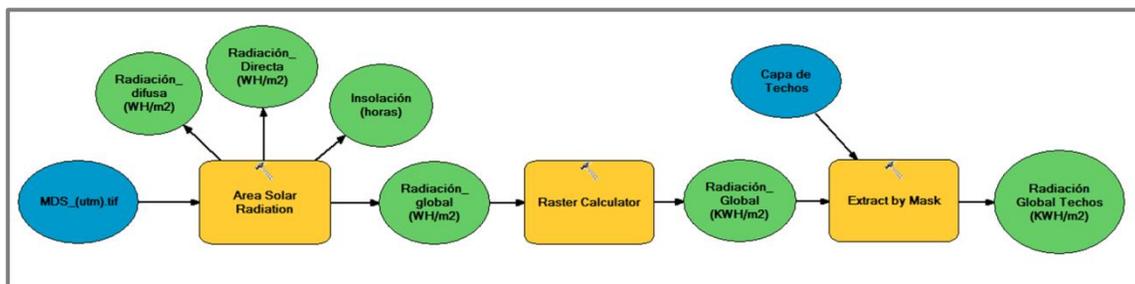
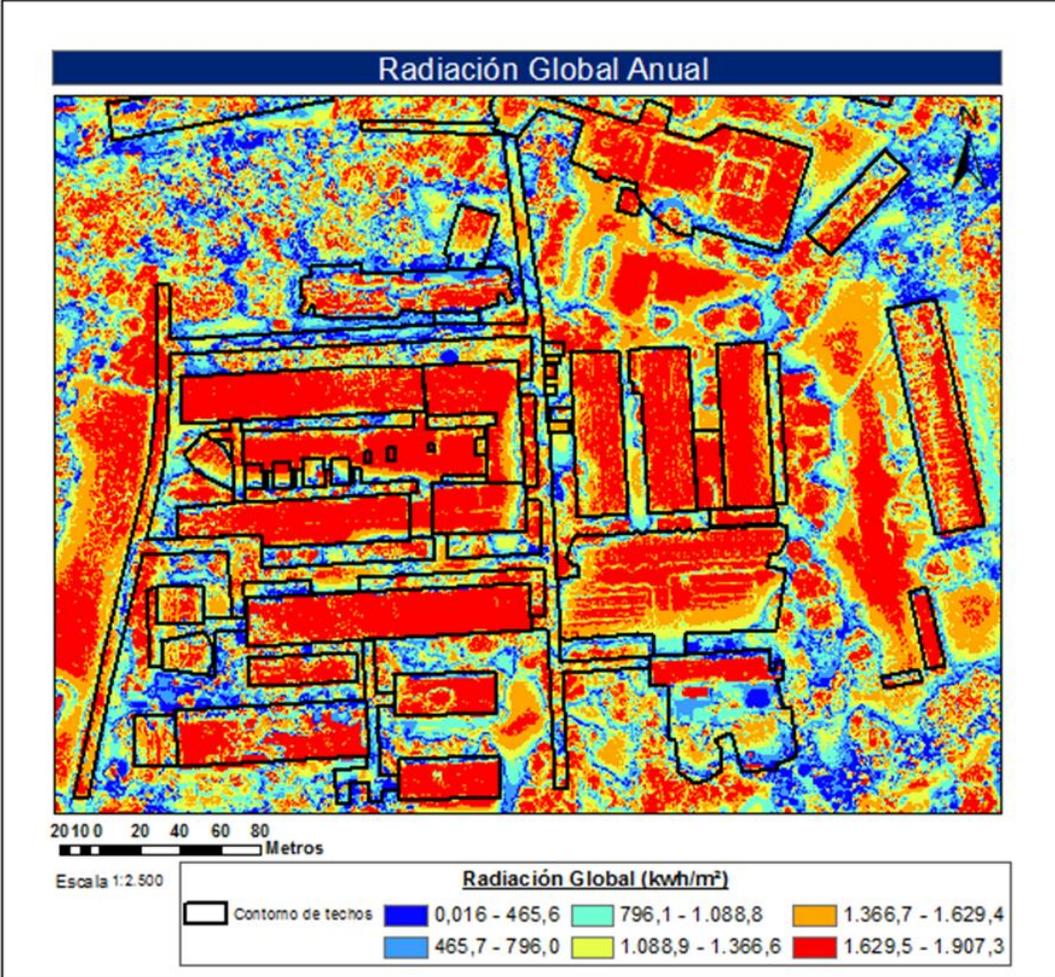


Figura 78. Modelo para la generación de la radiación solar

A continuación se muestra el mapa de radiación solar global generado por la caja de herramientas «Solar Radiation» de ArcGis 10.1, con valores en unidades convencionales (kwh/m^2) kilo watts horas por metros cuadrados, en el cual

podemos apreciar una elevada irradiación en la superficie de los edificios, siendo conveniente para instalaciones de arreglos fotovoltaicos.

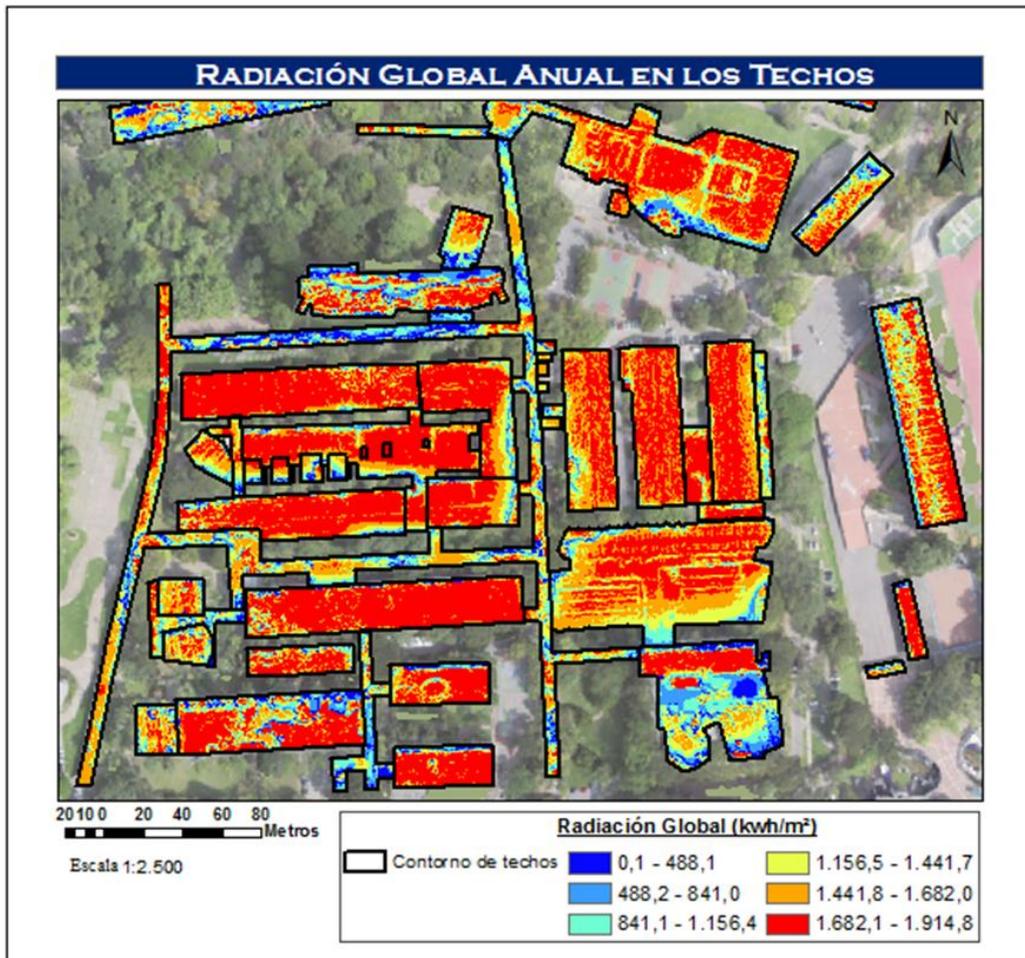


Mapa 15. Radiación Anual

Fuente: Elaboración Propia.

En la imagen que se observa a continuación, se muestra la obtención de la extracción de máscara según la delimitación de polígonos de los techos, para capturar los valores de radiación global en la superficie de los edificios, con esta

capa y otras ya generadas previamente se pretende buscar la energía que podría producir ciertos módulos fotovoltaicos existentes en el mercado y evaluar el más acertado para la instalación.



Mapa 16. Radiación Global Anual en los Techos de las Edificaciones

Fuente: Elaboración Propia.

3.6 POTENCIA INSTALADA POR LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

En un sistema fotovoltaico conectado a la red, la potencia instalada (potencia máxima en condiciones estándar) (en kWp) para cada tecnología de módulos fotovoltaicos en una superficie determinada se calcula con la fórmula (Wiginton, Nguyen y Pearce, 2010):

$$P = I_g * e * A_{PV}$$

Donde:

P = Potencia instalada.

I_g = Irradiación global = 1 kW/m² (en condiciones estándar de medida).

e = Eficiencia de los módulos fotovoltaicos.

A_{PV} = Superficie de techo disponible (área en m²).

En la estimación de la potencia instalada se aplica la fórmula de potencia mostrada anteriormente utilizando el tipo de módulo fotovoltaico para el que se quiere realizar el cálculo.

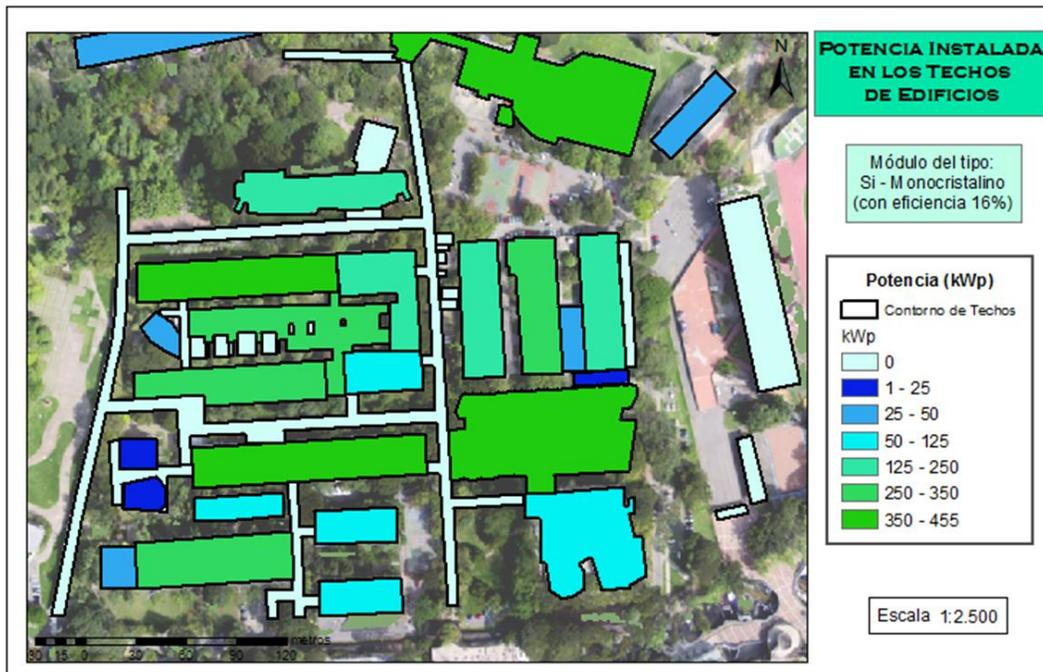
Cada modelo presenta valores de eficiencia propios, los cuales se observan en la siguiente tabla:

Tabla 6. Tipos de módulos fotovoltaicos según su eficiencia

Tipos de Módulo Fotovoltaico		Eficiencia
Cristal de Silicio	Si-monocristalino	16%
	Si-multicristalino	15%
Lámina Delgada	Cobre/Indio/Seleniuro	12%
	Telurio/Cadmio	10,50%
	Silicio amorfo	6%

Fuente: Elaboración Propia.

Se utiliza la herramienta «Raster Calculator» (calculadora raster) perteneciente al conjunto de herramientas de análisis espacial de ArcGis 10.1, se procede a aplicar la fórmula descrita anteriormente, escogiendo el tipo de módulo fotovoltaico con su eficiencia correspondiente y utilizando la capa raster de superficie de techos útil que representa el área disponible total en cada edificio, obtenemos como resultado un raster para cada uno de los tipos de módulos fotovoltaicos seleccionados con los valores de potencia por cada superficie útil, para luego analizar cuál podría ser el módulo que corresponde a un mejor aprovechamiento de la energía solar. Los resultados obtenidos de la potencia instalada por edificios para cada tipo de módulo fotovoltaico son los siguientes:



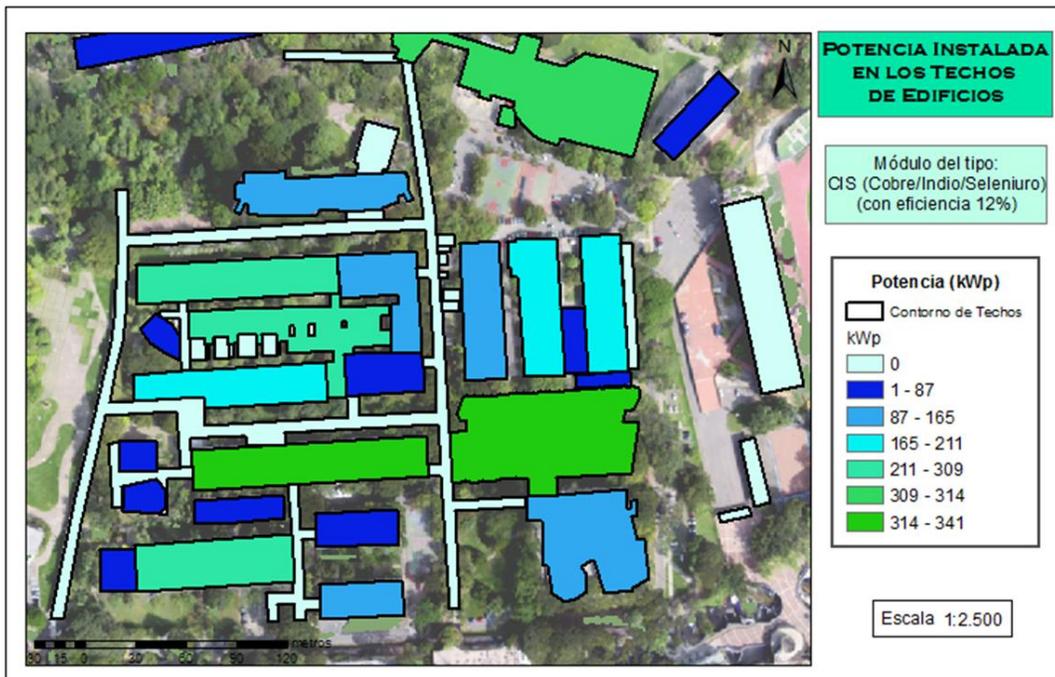
Mapa 17. Potencia instalada para módulos del tipo Si-monocristalino

Fuente: Elaboración Propia.



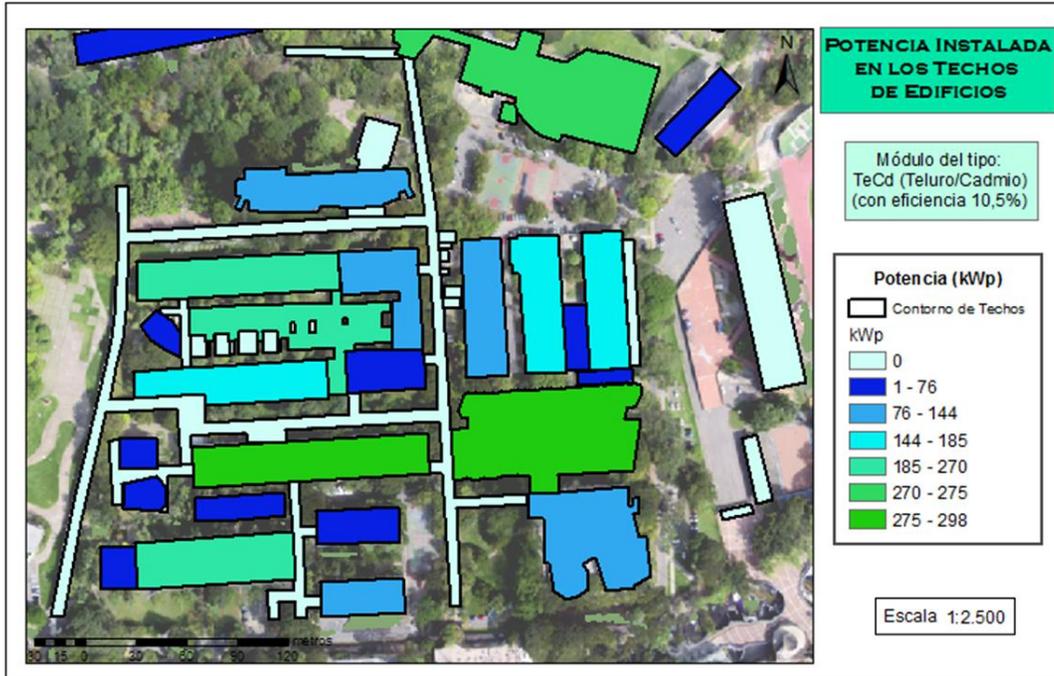
Mapa 18. Potencia instalada para módulos del tipo Si-multicristalino

Fuente: Elaboración Propia.



Mapa 19. Potencia instalada para módulos del tipo CIS

Fuente: Elaboración Propia.



Mapa 20. Potencia instalada para módulos del tipo TeCd

Fuente: Elaboración Propia.



Mapa 21. Potencia instalada para módulos del tipo Silicio amorfo

Fuente: Elaboración Propia.

3.7 ENERGÍA PRODUCIDA POR LOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Consiste en la estimación de la energía que producirán los diversos módulos fotovoltaicos existentes en el mercado, siendo éstos los más utilizados por mejor costo y eficiencia. Como con el módulo solar de ArcGis 10.1 se calcula la irradiación global anual, la fórmula utilizada será:

$$E = I_A * e * A_{PV} * PR$$

Donde:

E = Energía anual (kWh).

A_{PV} = Superficie de techo disponible

I_A = Irradiación solar global (kWh/m²).

(área en m²).

e = Eficiencia de los módulos FV.

PR = Performance Ratio = 0,8.

La estimación de la energía producida se lleva a cabo con la herramienta de calculadora raster «Raster Calculator» perteneciente al conjunto de herramientas de análisis espacial, se procede a escoger el tipo de módulo fotovoltaico con su eficiencia correspondiente, aplicando luego la fórmula con la capa raster generada anteriormente de Irradiación solar global por techo de edificios y con la capa de superficies disponibles que muestra el área útil de los techos de edificios. Se determinará la energía de cada tipo de módulo según su valor de eficiencia.

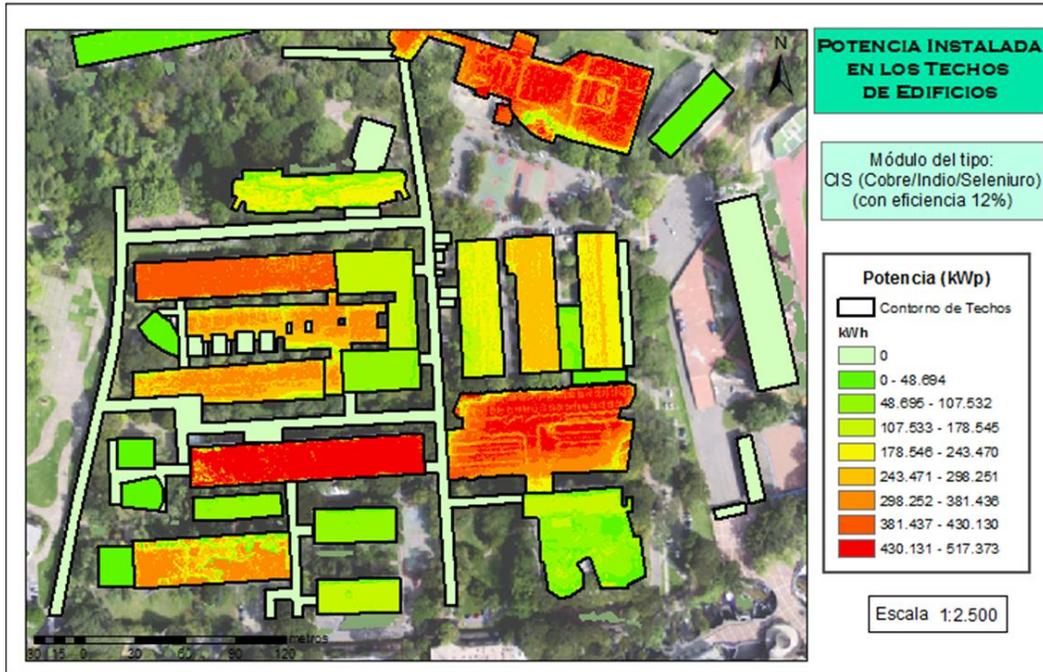
Al ejecutarse uno por uno se obtiene como resultado un raster de la energía producida por celda en la superficie útil para cada tipo de módulo fotovoltaico seleccionado, luego con lo obtenido analizar y determinar a cuál módulo corresponde un mejor aprovechamiento de la energía solar a través del arreglo fotovoltaico. Los resultados obtenidos de la potencia instalada por edificios para cada tipo de módulo fotovoltaico son los siguientes:



Mapa 22. Energía anual producida por módulos del tipo Si-monocristalino
Fuente: Elaboración Propia.



Mapa 23. Energía anual producida por módulos del tipo Si-multicristalino
Fuente: Elaboración Propia.



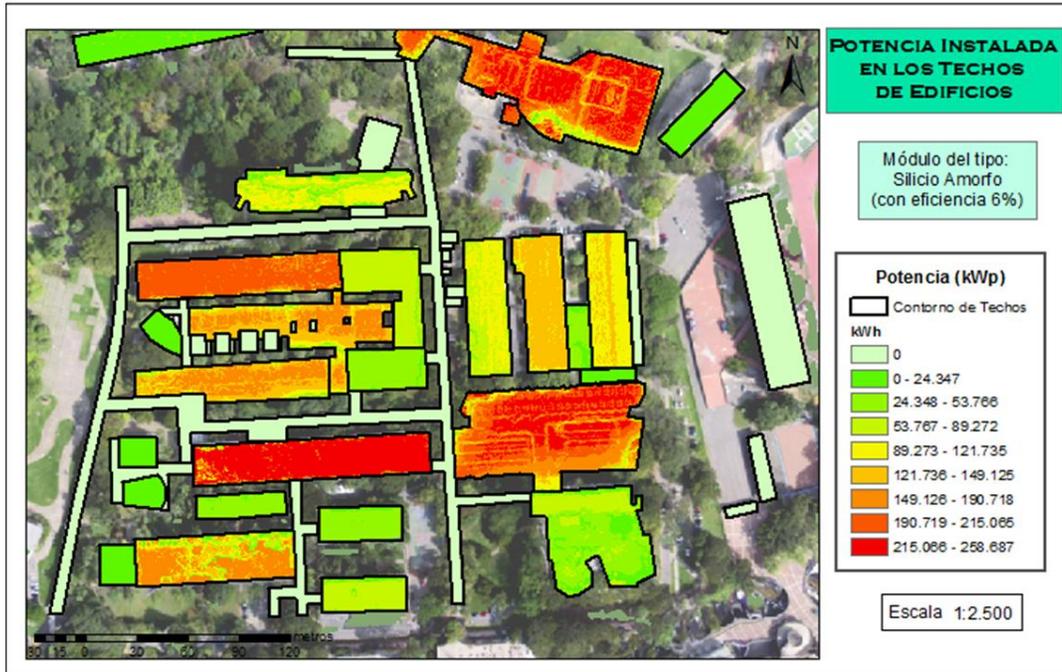
Mapa 24. Energía anual producida por módulos del tipo CIS

Fuente: Elaboración Propia.



Mapa 25. Energía anual producida por módulos del tipo TeCd

Fuente: Elaboración Propia.



Mapa 26. Energía anual producida por módulos del tipo Silicio Amorfo

Fuente: Elaboración Propia.

CAPITULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

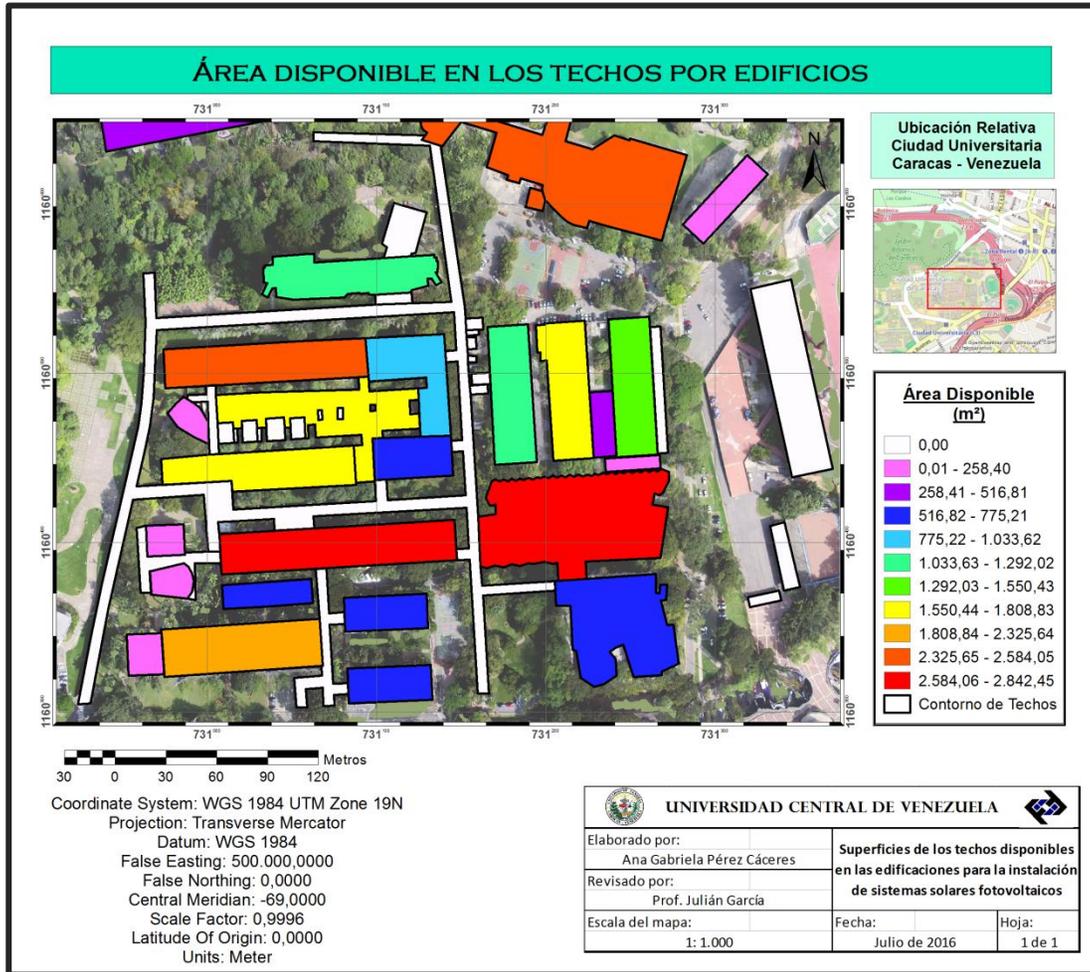
En este trabajo se ha desarrollado un modelo con ArcGis 10.1 con el que se pretende establecer cuáles son las zonas de mayor aptitud para la colocación de instalaciones de arreglos fotovoltaicos, adicionalmente se realiza una aproximación sobre la potencia y energía producida comparando los resultados que se obtendrían con diferentes tecnologías que existen en el mercado de módulos fotovoltaicos según su eficiencia.

Para realizar este análisis se ha incluido en el modelo una serie de herramientas desarrolladas en submodelos, gracias a la utilización del «Model Builder», uno de los instrumentos de ArcGis 10.1. Estos elementos han sido creados para resolver las necesidades que han aparecido a lo largo del procedimiento para la ejecución del modelo.

El objetivo final ha sido estudiar un área del núcleo urbano de la Ciudad Universitaria correspondiente a la Universidad Central de Venezuela U.C.V. Se trata de incorporar en un proyecto todos los datos de ésta zona necesarios para facilitar su análisis y delimitar aquellos techos de los edificios que reúnen las mejores condiciones para aplicaciones solares, siendo para ésta zona (hemisferio Norte) una situación óptima de: orientación Sur, Sureste y Suroeste, con una inclinación máxima de aproximadamente 35°, superficie con el mayor tiempo posible sin sombra producida por sus alrededores, incluyendo otros dos criterios adicionales correspondientes a la evaluación de mantenimiento y soporte para los arreglos fotovoltaicos.

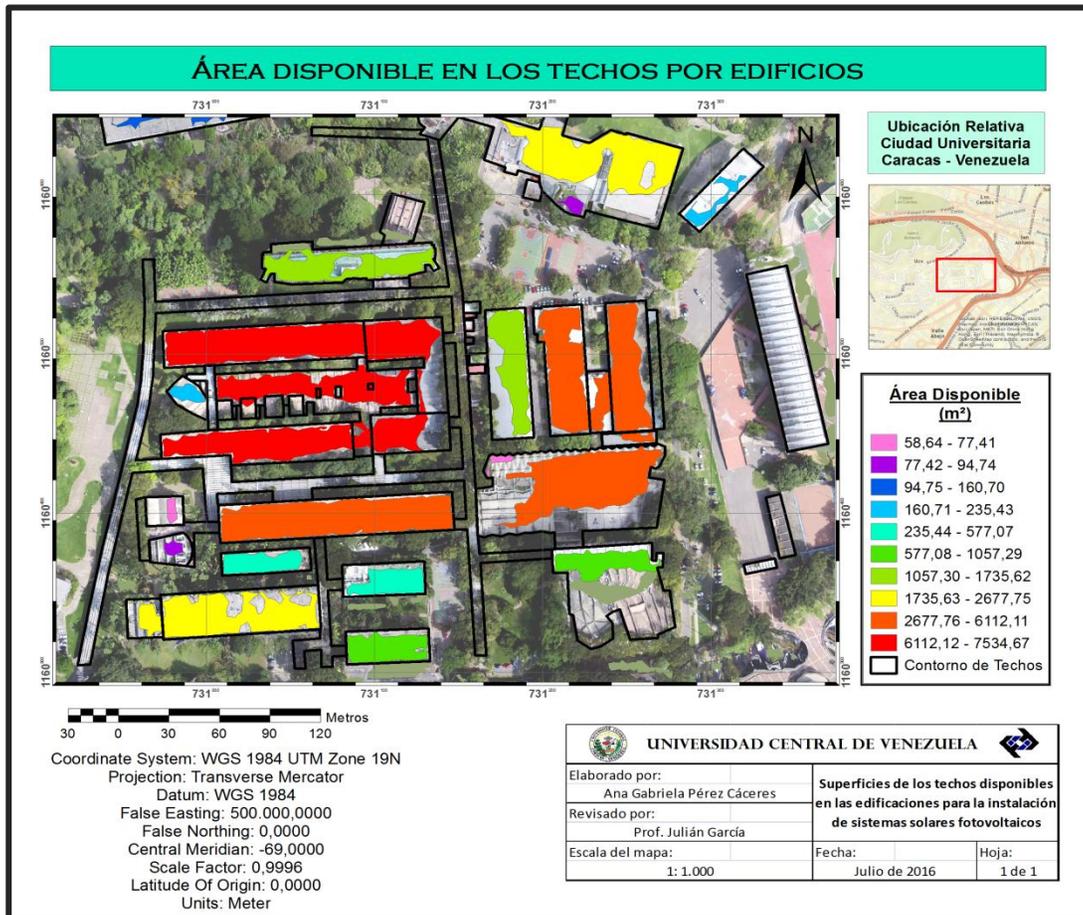
En el presente trabajo se genera un mapa cartográfico base para el desarrollo del mismo que se utiliza como una capa fuente, a través de la actualización de cartografía existente, con apoyo del Modelo Digital de Superficie (MDS) y ortofoto de la zona procesada mediante fotografías tomadas desde un dron; el cual resulta

esencial para la creación de una capa raster siendo éste un Modelo Digital de Superficie en los techos de las edificaciones, mostrando la altitud de los mismos; necesario para dar pie a la creación del mapa de superficie de los techos de edificios con área útil para la colocación de paneles solares fotovoltaicos, evaluando diferentes criterios importantes que pueden afectar a los arreglos fotovoltaicos en su producción de potencia y energía para obtener del mismo un mejor aprovechamiento de la energía solar. Para evaluar estos criterios se realiza un análisis multicriterio booleano con las características que deben cumplir en cada emplazamiento, aplicando así una lógica borrosa, es decir se crean unas capas binarias de dichas restricciones las cuales se superponen según la lógica borrosa. El resultado obtenido es proyectado visualmente, no sólo con la ubicación exacta para la colocación sino mostrando esas zonas más afectadas en el área de los techos de la superficie de edificios que no convenga con la instalación de los arreglos, también se genera un mapa que muestra en cada superficie de techos el área total útil. A continuación se presenta el mapa (Mapa 27) de superficie de los techos con el área potencialmente utilizable para la instalación de dichos arreglos fotovoltaicos, junto con el mapa (Mapa 28) de la ubicación accesible resultante para su colocación.



Mapa 27. Área en las superficies de los techos disponibles en las edificaciones para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos.

Fuente: Elaboración Propia



Mapa 28. La ubicación del área en las superficies de los techos disponibles en las edificaciones para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos.

Fuente: Elaboración Propia.

El área de disponibilidad para la instalación de arreglos fotovoltaicos que se observan en los resultados obtenidos a través de los mapas presentados, representan una extensión de área muy amplia aprovechable para la colocación de estos arreglos; siendo el mínimo el edificio del Decanato de la Facultad de Ingeniería con 520 m² aproximadamente y el máximo la escuela básica de la Facultad de Ingeniería con 2800 m² aproximadamente, y si nos referimos en conjunto de la superficie de techos observamos que la Facultad de Humanidades posee un total entre los edificios que ocupa de 7500 m² aproximadamente.

A continuación se presenta una tabla con el área disponible por edificio en la zona de estudio (Ciudad Universitaria U.C.V), junto con el área total por Facultad.

Tabla 7. Área de Superficie disponible en los edificios involucrados en la zona de estudio perteneciente a la U.C.V.

Edificios Involucrados en la Zona de Estudio de la U.C.V.		Área (m ²)	Total área por Facultad (m ²)
Facultad de Humanidades y Educación/ Ciencias Jurídicas y Políticas		589,9	7505,2
		980,3	
		2391,9	
		1761,5	
		1781,5	
Facultad de Ingeniería	Edificio de Ingeniería Química, Petróleo, Geología, Minas y Geofísica	2076,4	8040,2
	Decanato de Ingeniería	519,9	
	Biblioteca y Auditorio	158,7	
	Edificio de Física Aplicada	576,9	
	Escuela Básica	2842,5	
	Edificio Ingeniería Eléctrica	743,9	
	Departamento de Química Aplicada	1121,9	
Facultad de Arquitectura y Urbanismo		2620,0	3348,4
		728,4	
Facultad de Ciencias Económicas y Sociales		1235,3	1235,3
Escuela de Bioanálisis		1666,2	1666,2
Escuela de Estudios Políticos y Administrativos		1932,2	1932,2

Fuente: Elaboración Propia.

Al realizarse el análisis se tiene como resultados que la superficie de techos para instalar módulos fotovoltaicos posee un aproximado de total en área a cubrir en los edificios evaluados de 23.000 m², teniendo éstos un total en área de 41.000 m², lo que nos dice que se aprovecha un 56,10% del área de la superficie de los techos de los edificios, es decir más de la mitad, representando un área bastante aprovechable para éstas nuevas tecnologías que ayudarán con la producción de energía eléctrica, siendo ésta una zona que presenta una situación óptima que reúne las mejores condiciones para aplicaciones solares.

La radiación solar que llega a una superficie varía dependiendo de la posición de los edificios, la orientación de los techos y la presencia de elementos que generen sombras. El algoritmo que calcula la radiación global en ArcGis tiene en cuenta estos elementos y determina un máximo de 1914,77 kWh/m² en los techos de la zona analizada considerando unas condiciones atmosféricas de cielo despejado.

Si se comparan los datos de irradiación global solar con diversas páginas que generen datos de este tipo y muestras tomadas con instrumentos se observan ciertas diferencias, siendo las de ArcGis valores altos; este margen puede ser debido a que la irradiación solar determinada en el modelo considera la forma de la envolvente de los edificios con el MDS, mientras que los diferentes sitios de obtención de este tipo de suministro utilizan, en su mayoría, datos de irradiación sobre el plano horizontal. No resulta alarmante, debido a que no se presenta una diferencia tan marcada que pudiese afectar a los resultados.

La eficiencia de los paneles solares depende de diferentes factores como su temperatura, exposición al Sol directo, inclinación, orientación, sombras, entre otros. Existen una gran variedad de módulos fotovoltaicos en el mercado que se diferencian principalmente en el material del que están constituidos y en su forma de fabricación. Éste modelo de superficie útil ayuda a crear diversos mapas para

la evaluación al momento de escoger el módulo fotovoltaico más conveniente de acuerdo a su eficiencia según su potencia y energía generada, es decir el que aproveche de la mejor manera posible la energía solar.

Las características propias de cada uno de los módulos hacen que los valores de eficiencia oscilen entre el 16% del tipo Si-monocristalino al 6% del tipo Silicio amorfo. Estas diferencias en la eficiencia de los módulos originan unos resultados bastantes dispares en la potencia y energía que puedan producir según los tipos.

En la tabla siguiente se muestra la representación de los valores máximos que se pudieron obtener con los modelos generados a partir de la superficie útil y en el caso de la energía en conjunto con la radiación global obtenida gracias a las herramientas de ArcGis, esta evaluación se considera en cada tipo de módulo fotovoltaico.

Tabla 8. Resultado de Potencia y Energía máximas obtenidas en las representaciones gráficas según los tipos de módulo fotovoltaico

Tipos de Módulo Fotovoltaico		Eficiencia	Potencia Instalada (kWp) Máxima	Energía Producida (kWh) Máxima
Cristal de Silicio	Si-monocristalino	16%	350 - 455	616.791 - 689.831
	Si-multicristalino	15%	350 - 425	537.664 - 646.717
Lámina Delgada	Cobre/Indio/Seleniuro	12%	314 - 341	430.131 - 517.373
	Telurio/Cadmio	10,50%	275 - 298	376.365 - 452.702
	Silicio amorfo	6%	157 - 171	215.086 - 258.687

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación se muestra una serie de histogramas de los valores de potencia instalada y energía producida por parte de los módulos fotovoltaicos utilizando la superficie útil generada con anterioridad, para lograr diferenciar el comportamiento de cada módulo fotovoltaico en las superficies disponibles en los techos y, según

convenga por producción de energía y de potencia, más los costos que puedan tener cada módulo, conseguir escoger el más idóneo, eficiente y eficaz para su utilización como el módulo fotovoltaico que pretende ubicarse en las superficie de los techos de los edificios. Estos histogramas fueron generados por la herramienta «Histogram» en el software de ArcGis 10.1, gracias a las capas de potencia y energía generadas previamente.

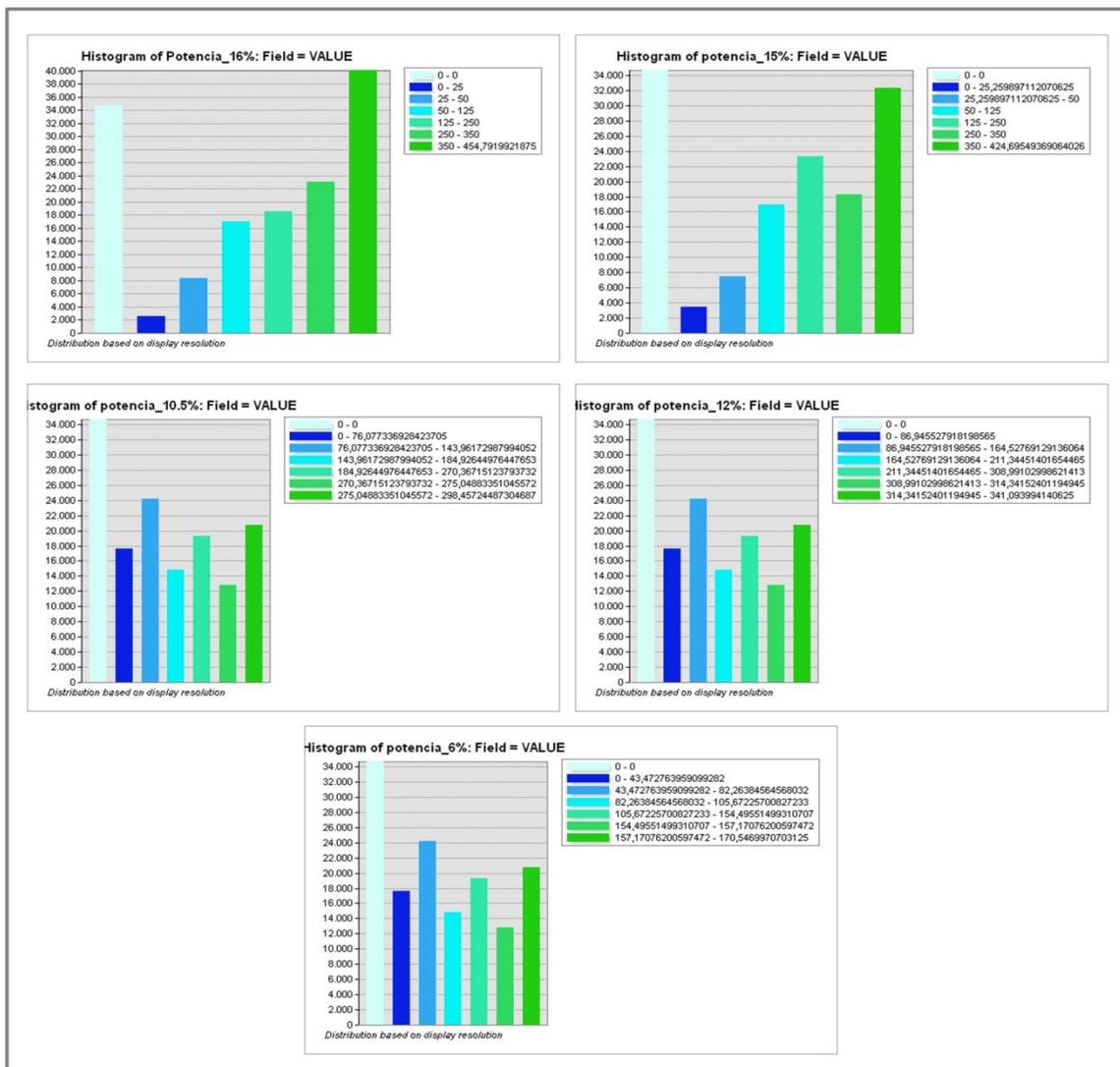


Figura 79. Histogramas de la Potencia Instalada en diversos Módulo Fotovoltaico según su eficiencia

Fuente: Elaboración Propia.

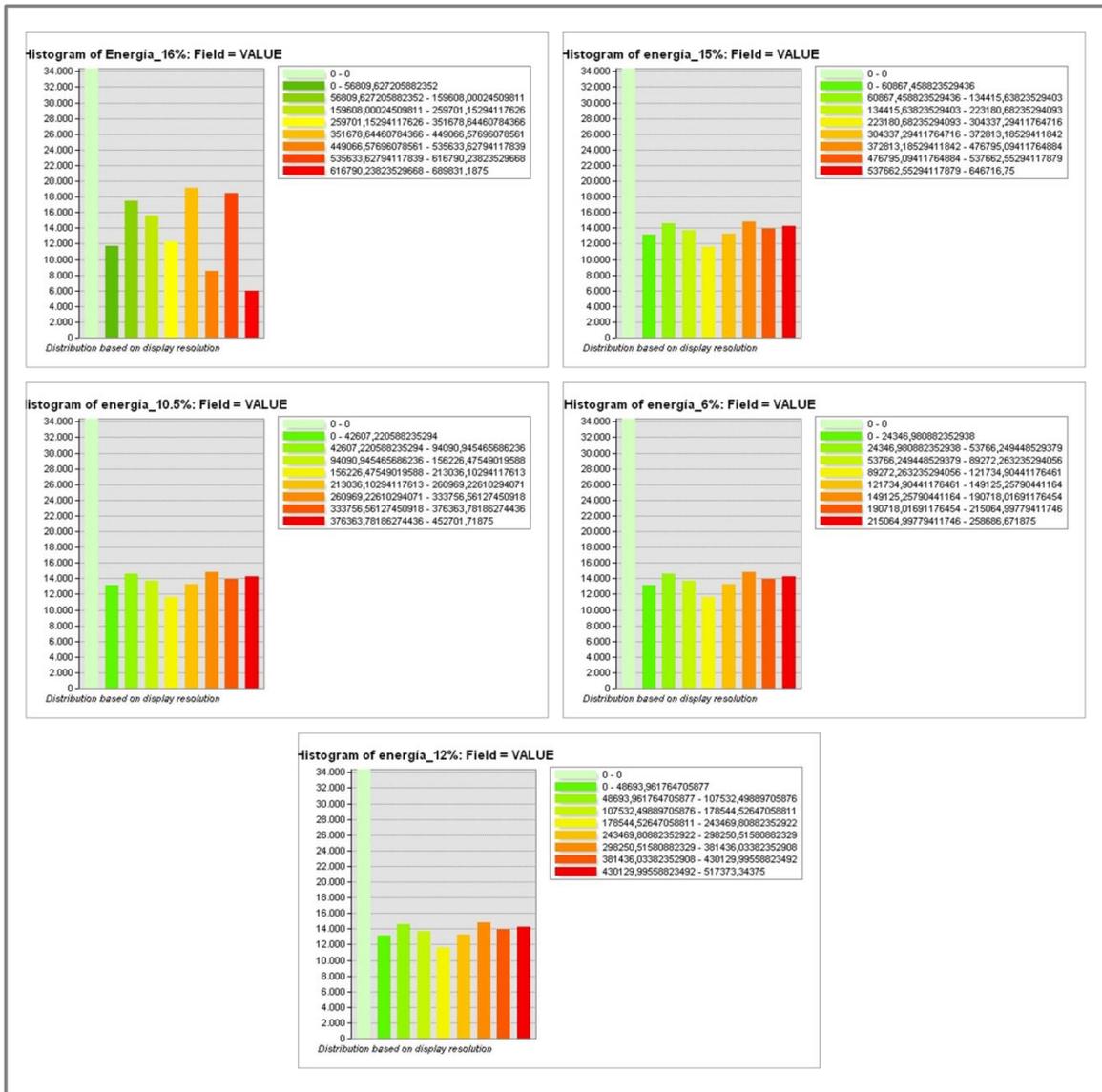


Figura 80. Histogramas de la Energía producida en diversos Módulo Fotovoltaico según su eficiencia.

Fuente: Elaboración Propia.

Al realizar el análisis podemos observar que los módulos Si-monocristalino con eficiencia de 16% la potencia máxima que genera es más elevada con respecto a los otros tipos de módulos, incluso en la energía producida, aunque no en la

misma cantidad y proporción que en el tipo de módulo Si-multicristalino de 15% de eficiencia. Se puede decir que para tomar una decisión con respecto a la utilización de un tipo de módulo fotovoltaico es afectado por el costo, estos resultados sirven para conocer cuánto podrán aprovechar la energía solar según decidan escoger el módulo fotovoltaico que se adecúe económicamente.

Este modelo desarrollado en el presente trabajo no sólo permite realizar cálculos globales para una zona determinada sino que también proporciona como resultado final los datos individuales de cada edificio. Se obtiene una relación de sus valores asociados de superficie, potencia instalada y energía producida que se han calculado a lo largo del modelo; pretendiendo su uso para lograr la mejor captación de energía solar a través de sistemas de arreglos fotovoltaicos.

CAPITULO V. CONCLUSIONES

Es importante resaltar que a lo largo del presente trabajo especial de grado se realizó el estudio de factibilidad de implementación de sistemas fotovoltaicos en diversos edificios de la Universidad Central de Venezuela U.C.V. de manera de contribuir con el ahorro energético, optimización y renovación de la energía eléctrica de la que requiere abastecerse dicha entidad, a demás apoyar la nueva tecnología que va de la mano junto con la protección del medio ambiente y nos enseña a aprovechar los recursos que nos brinda nuestro entorno. La solución que se brinda a través de éste trabajo es la creación del mapa donde se pueda visualizar aquellos techos disponibles para tal uso de instalaciones fotovoltaicos.

La colocación de energía fotovoltaica en áreas urbanas requiere un detallado análisis multicriterio de una gran cantidad de variables asociadas a entidades espaciales y no cabe duda que los Sistemas de Información Geográfica responden adecuadamente a las necesidades de este tipo de estudios.

En este caso se ha realizado un estudio experimental sobre un área que nos ha permitido desarrollar un modelo y conocer las posibilidades de implementar esta técnica en las aplicaciones fotovoltaicas en edificios. La metodología planteada establece una serie de criterios con los que se evalúan las zonas adecuadas para la instalación de módulos fotovoltaicos solares, siendo necesario utilizar para cada una de las fases del procedimiento un software sumamente útil y de fácil comprensión ArcGis 10.1, utilizando datos base con la generación de una cartografía básica esencial para el desarrollo del trabajo mediante la actualización cartográfica y apoyándonos en Modelos Digitales 3D (MDS) y la ortofoto del lugar, generado a partir de tecnología en auge, el Dron (Vehículo aéreo no tripulado).

Una de las ventajas del desarrollo de este método es que presenta la opción de escoger entre varios tipos de módulos fotovoltaicos y calcular la energía generada

por cada uno, ya que existe una variedad de módulos debido a la eficiencia que presenta, por lo tanto con algunos se necesitará una mayor superficie para obtener una misma producción de electricidad. Al poder comparar los resultados de las diferentes tecnologías, se podrá decidir cuál es la opción que más compensa teniendo en cuenta el coste de los módulos y la superficie disponible.

Una particularidad importante de este procedimiento es la estimación de las sombras ocasionadas no sólo por los edificios sino también por los árboles presentes en la zona, éste criterio ayuda a generar un mapa con mejor confiabilidad y precisión al momento de proyectar la disponibilidad en área para la colocación de sistemas fotovoltaicos.

En definitiva, los análisis geográficos pueden ayudar a fomentar el mercado de las energías renovables además de impulsar las políticas que faciliten el desarrollo de tecnologías fotovoltaicas.

CAPITULO VI. RECOMENDACIONES

Entre las recomendaciones a realizar es el hecho de que a demás de la delimitación de otros elementos en los techos y los árboles, en el futuro se pudiese trabajar con nuevos criterios que permitan mejorar la precisión de los resultados obtenidos al considerar un mayor número de variables. Una posibilidad consistiría en utilizar datos relacionados con la población en las edificaciones para calcular la producción de energía per cápita. Se podría trabajar con factores climáticos como las variaciones de temperatura o incluso la influencia del viento sobre la disposición de los módulos fotovoltaicos. Del mismo modo, junto con estas mejoras futuras queda abierta la alternativa de crear herramientas específicas que posibiliten la aplicación de los nuevos criterios establecidos en el modelo.

Otra recomendación viable en pro del medio ambiente y a fin de lograr un mayor aprovechamiento es la reducción del consumo energético de la instalación, el cual no solo contribuye significativamente al ahorro energético sino que se reduce considerablemente la cantidad de materiales y equipos necesarios en el dimensionamiento del sistema fotovoltaico lo cual es una gran ventaja ya que se reducen los costos asociados a la inversión inicial y además se logra un diseño más óptimo debido al mejor aprovechamiento del espacio físico.

A demás recomiendo implementar normativas que ayuden al ahorro de energía en edificaciones por construir y existentes para instalaciones de sistemas fotovoltaicos en Venezuela, para lograr una eficiencia energética, donde se propongan procedimientos, caracterizaciones y cuantificaciones de exigencias energéticas y así crear fórmulas definidas.

CAPITULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baratçabal, P., Batellier, J. P. & Chauliaguet, C. (1978). *La Energía Solar en la Edificación*. España – Barcelona: 1° ed., Editores técnicos asociados, S.A.
- Chaves, A. y Bahill A.T. (2010). Locating sites for photovoltaic solar panels. Pilot study uses DEM derived from LiDAR. ESRI. *Renewable Energy*, Vol. 13 No. 4, pag. 24-27.
- Cusa, J. (1994). *Energía solar para viviendas*. España – Barcelona: 4° ed., Grupo Editorial Ceac, S.A.
- Enríquez Harper, G. (2012). *Instalaciones Eléctricas Domésticas Convencionales y Solares Fotovoltaicas*. México: Grupo Noriega Editores, Editorial Limusa, S.A.
- Felicísimo, A. M. (1994). *Modelos Digitales de Terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. España – Oviedo. Recuperado Abril de 2016, de publicaciones: <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>.
- Fundación de la energía de la comunidad de Madrid, (2015). *Los Drones y su aplicación a la Ingeniería Civil*. España – Madrid. Recuperado Marzo de 2016, de publicaciones: <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Los-Drones-y-sus-aplicaciones-a-la-ingenieria-civil-fenercom-2015.pdf>.
- González Bordón, J. M. & Palmero Hernández, N. (1990). *Manual Práctico de Astronomía Geodésica*. Cuba – La Habana: Editorial Pueblo y Educación.

- Jauregui, L. (2005). *Nociones de Fotogrametría Digital*. Recuperado Julio de 2015, de publicaciones:
<http://webdelprofesor.ula.ve/iluis/publicaciones/Fotogrametr%Eda/FOTOGRA METRIA%20DIGITALparte1.pdf>.
- Lerma G., José Luis. (2002). *Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital*. UPV Valencia – Venezuela.
- Pérez Álvarez, J. A. (2001). *Apuntes de Fotogrametría III*. Universidad de Extremadura. Centro Universitario de Mérida. Mérida – España. Recuperado Enero 2016, de publicaciones:
<http://redgeomatrica.rediris.es/cartoprofesores/Fotogrametria/ApuntesFotogrametria3.pdf>
- Sabady, P. R. (1989). *Arquitectura Solar: Concepto, Cálculo y Ejecución de Edificaciones Solares*. España – Barcelona: 2º ed., Ediciones Ceac, S.A.
- Szokolay, S. V. (1978). *Energía Solar y Edificación*. España – Barcelona: 2º ed., Editorial Blume.

TESIS CONSULTADAS:

- Bermúdez B., Gabriel. (2008). *Especificación de un sistema de generación de energía eléctrica usando paneles fotovoltaicos*. Tesis de pregrado. Universidad Central de Venezuela, Caracas – Venezuela. Recuperado de <http://www.academia.edu>.

- Bonis Martín, V. (2011). *Decisión multicriterio booleana, probabilística y posibilística borrosa de la distribución de abies pinsapo boiss*. Tesis de Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica. Universidad Complutense de Madrid, Madrid – España. Recuperado de: http://eprints.ucm.es/13982/1/Distribuci%C3%B3n_pinsapo.pdf.
- Delgado, S., & Seekatz, A. (2011). *Estudio de la aplicación de paneles fotovoltaicos como fuente de energía alterna, en desarrollos de viviendas de interés social*. Tesis de Pregrado. Universidad Católica Andrés Bello, Caracas – Venezuela. Recuperado de <http://biblioteca2.ucab.edu.ve/>
- González Solórzano, S. (2015). *Metodología para validar datos geoespaciales adquiridos con vehículos aéreos no tripulados*. Tesis de Pregrado. Universidad Central de Venezuela, Caracas – Venezuela. Recuperado de la biblioteca del Departamento de Ingeniería Geodésica y Agrimensura de la UCV.
- Martín Ávila, A. M. (2014). *Modelo Geográfico para la Estimación del Potencial Fotovoltaico en Tejados. Caso Estudio: Miraflores de la Sierra*. Tesis de Maestría en Tecnologías de la Información Geográfica. Universidad Complutense de Madrid, Madrid – España. Recuperado de <http://eprints.ucm.es>.
- Sánchez, B. J. (2012). *Estudio de factibilidad en la implementación de un sistema basado en paneles fotovoltaicos para reducir el consumo de energía eléctrica en la facultad de ingeniería U.C.V.* Tesis de Pregrado. Universidad Central de Venezuela, Caracas – Venezuela. Recuperado de <http://www.academia.edu>.

RECURSOS DIGITALES:

- Earth System Research Laboratory. Physical Science Division, 2005. [En línea] Disponible: <<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/>> [Consultado: 2016].
- ECOTECT COMMUNITY WIKI. Archive site for Autodesk Ecotect Analysis educational resources, notes and tutorials, 2016. [En línea] Disponible: <<http://wiki.naturalfrequency.com>> [Consultado: 2016].
- ESRI, 2014. *Biblioteca de ayuda de ArcGIS 10.1*. [En línea] Disponible: <<http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/>> [Consultado 2016].
- SunEarthTools.com, 2016. *Herramientas para los consumidores y los diseñadores de la energía solar*. [En línea] Disponible: <<http://www.sunearthtools.com/>> [Consultado: 2016].
- The National Aeronautics and Space Administration (NASA). [En línea] Disponible: <<http://www.eosweb.larc.nasa.gov>> [Consultado: 2016].

CAPITULO VII. APÉNDICE

Apéndice I

Reporte de los resultados obtenidos en levantamiento Fotogramétrico de la Universidad Central de Venezuela (U.C.V.) mediante fotografías tomadas a través de tecnología en auge, Dron (vehículo aéreo no tripulado).

TESIS DRON UCV

REPORTE



Survey Data

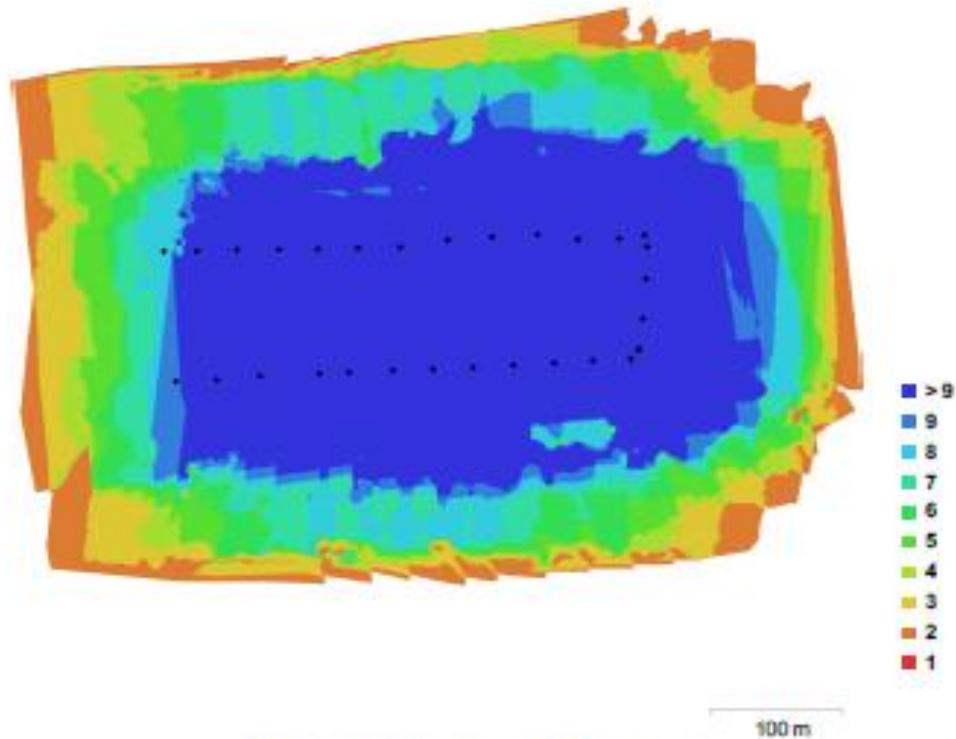


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	30	Camera stations:	30
Flying altitude:	150 m	Tie points:	7,223
Ground resolution:	7.34 cm/pix	Projections:	20,543
Coverage area:	2.62e+05 sq m	Reprojection error:	2.88 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
PHANTOM VISION FC200 (5 mm)	4384 x 3288	5 mm	1.41 x 1.41 μ m	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration

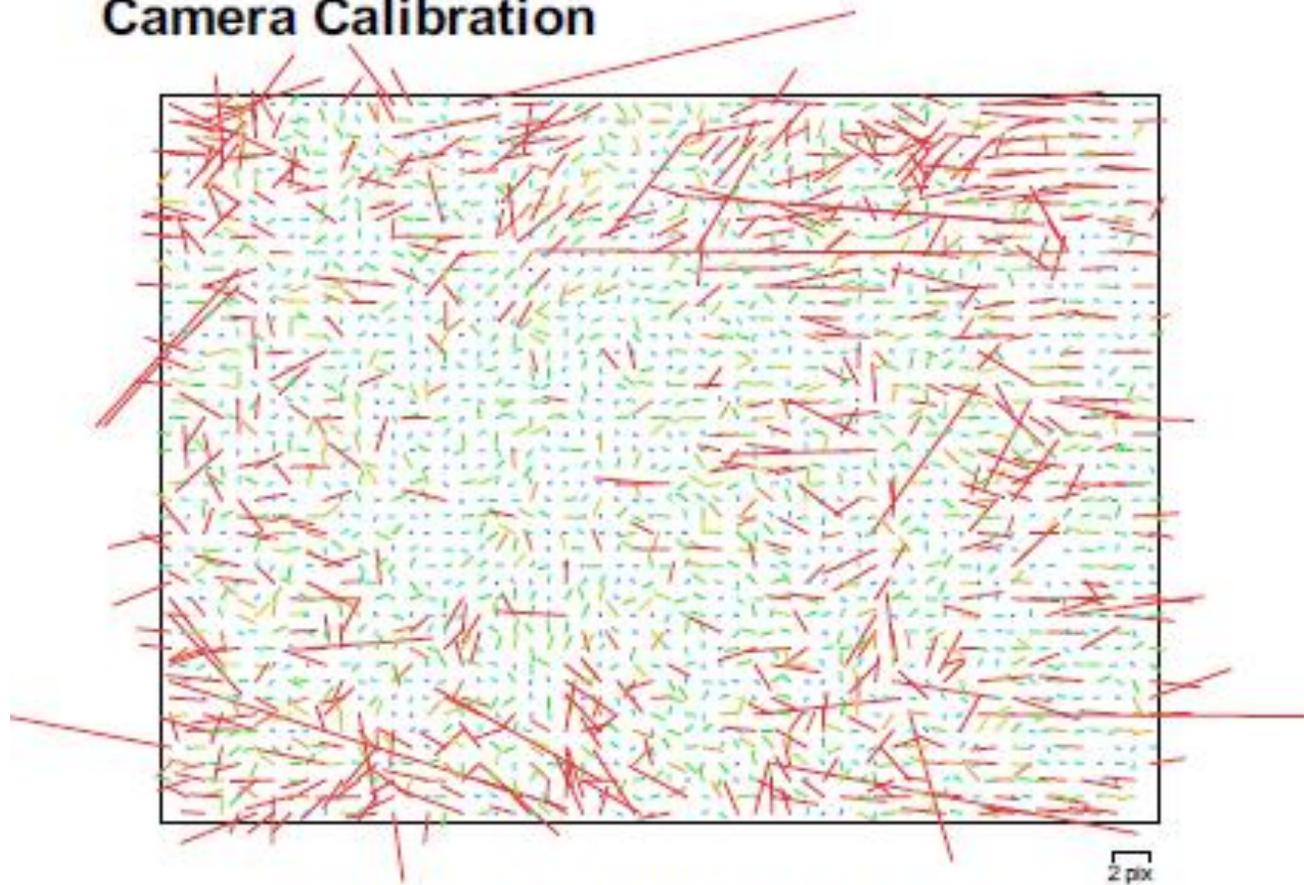


Fig. 2. Image residuals for PHANTOM VISION FC200 (5 mm).

PHANTOM VISION FC200 (5 mm)

Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
4384 x 3288	5 mm	1.41 x 1.41 um	No
Type:	Frame	Skew:	0.564735
Fx:	1479.51	Cx:	2293.99
Fy:	1478.47	Cy:	1703.75
K1:	-0.0357889	P1:	-0.00262058
K2:	0.0151009	P2:	0.00269216
K3:	-0.00206192	P3:	0
K4:	0	P4:	0

Camera Locations

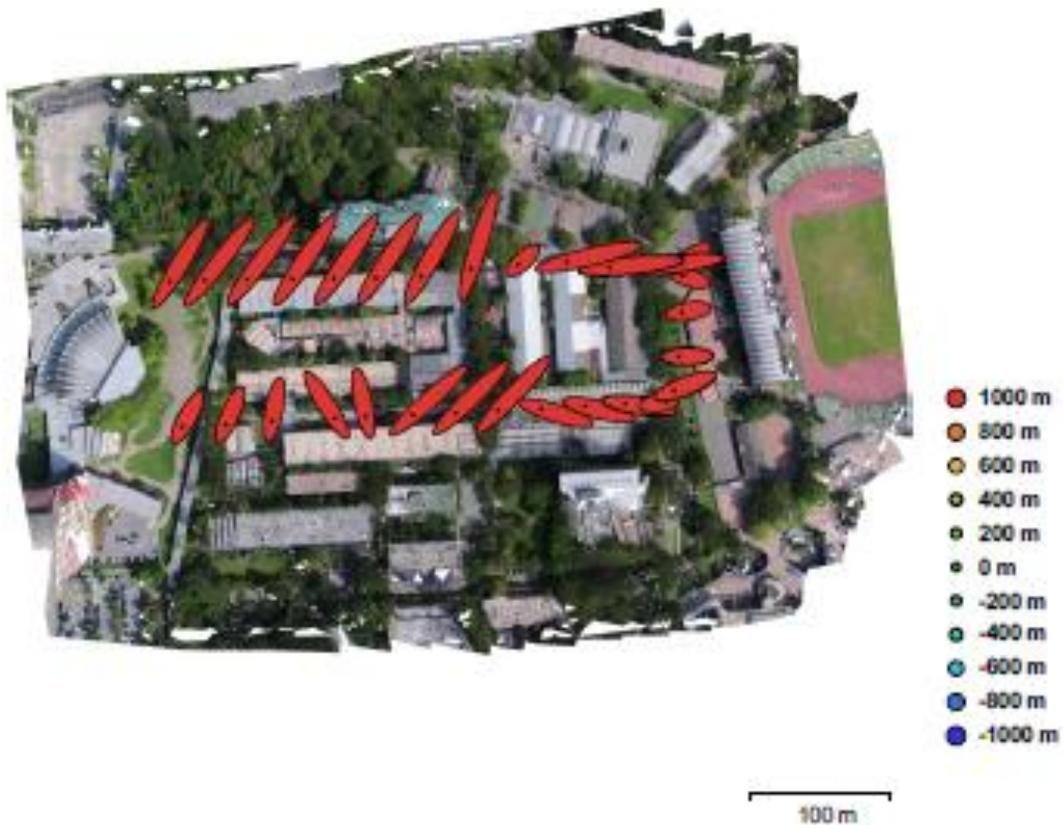


Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.

Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	XY error (m)	Z error (m)	Total error (m)
17.9438	17.9263	25.364	975.3	975.63

Table 2. Average camera location error.

Ground Control Points



Fig. 4. GCP locations.

Label	XY error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
point 1	0.0307135	0.00470782	0.0310723	9	0.308
point 2	0.0285677	0.00305562	0.0287306	13	0.340
point 3	0.0858495	0.00474304	0.0859804	21	0.406
point 4	0.0822735	-0.00134069	0.0822844	13	1.181
point 5	0.0738638	-0.00571315	0.0740844	18	0.326
Total	0.0653519	0.00420557	0.0654871		0.591

Table 3. Control points.

Digital Elevation Model

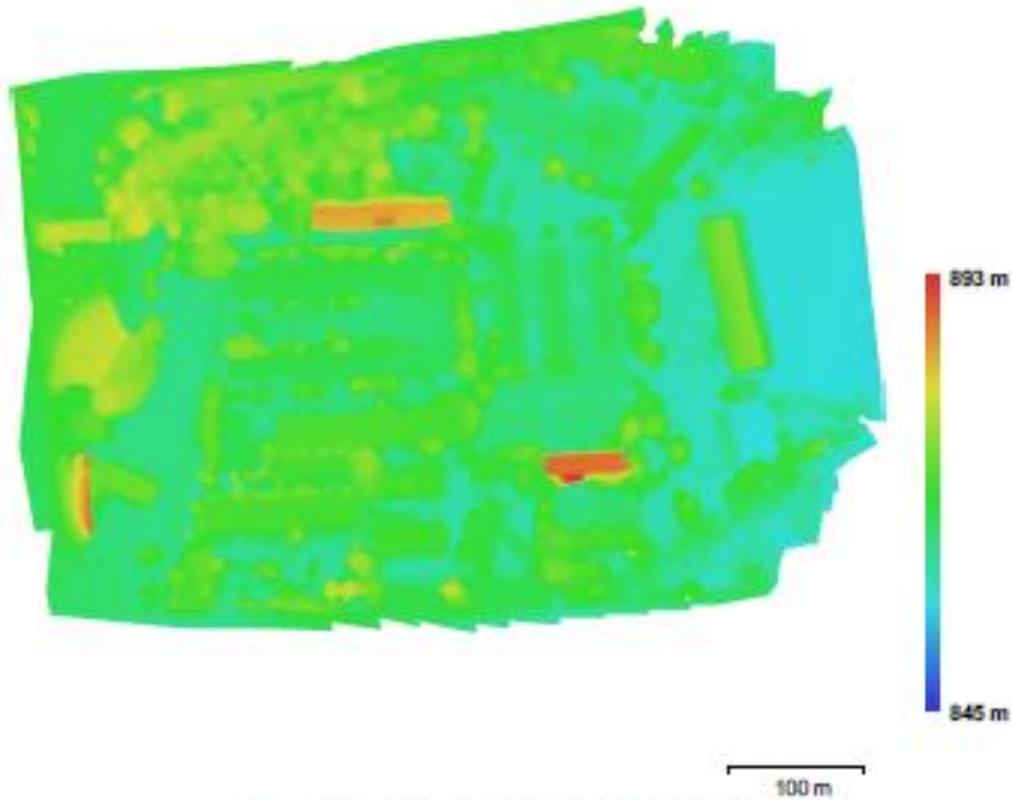


Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 29.3 cm/pix
Point density: 11.6103 points per sq m

Processing Parameters

General	
Cameras	30
Aligned cameras	30
Markers	5
Coordinate system	WGS 84 / UTMzone 19N (EPSG:32619)
Point Cloud	
Points	7,223 of 8,963
RMS reprojection error	1.21394 (2.88097 pix)
Max reprojection error	39.8345 (83.3571 pix)
Mean keypoint size	3.30844 pix
Effective overlap	3.17304
Alignment parameters	
Accuracy	Highest
Pair preselection	Generic
Keypoint limit	4,000
Tie point limit	1,000
Constrain features by mask	No
Matching time	2 minutes 59 seconds
Alignment time	12 seconds
Optimization parameters	
Parameters	fx, fy, cx, cy, skew, k1-k3, p1, p2
Optimization time	3 seconds
Dense Point Cloud	
Points	5,517,500
Reconstruction parameters	
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Processing time	3 minutes 13 seconds
Model	
Faces	84,440
Vertices	42,940
Texture	4,096 x 4,096, uint8
Reconstruction parameters	
Surface type	Height field
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Quality	Medium
Depth filtering	Aggressive
Face count	88,565
Processing time	9 seconds
Texturing parameters	
Mapping mode	Orthophoto
Blending mode	Mosaic
Texture size	4,096 x 4,096
UV mapping time	2 seconds
Blending time	40 seconds
DEM	
Size	2,534 x 2,010
Coordinate system	WGS 84 (EPSG:4326)

Apéndice II

Tabla correspondiente a la posición del Sol indicado el mes de Marzo, en el cual ocurre el cambio de estación a Equinoccio de Primavera (20 de Marzo).

Tabla 9. Posición (Elevación y Azimut) del Sol mes de Marzo.

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	3	1	8	3,49	87,20
2015	3	1	10	32,36	92,74
2015	3	1	12	59,27	103,79
2015	3	1	14	71,31	228,65
2015	3	1	16	50,77	263,17
2015	3	1	18	22,83	270,17
2015	3	2	8	3,62	87,57
2015	3	2	10	32,52	93,21
2015	3	2	12	59,53	104,66
2015	3	2	14	71,66	226,63
2015	3	2	16	50,90	262,52
2015	3	2	18	22,88	269,74
2015	3	3	8	3,74	87,94
2015	3	3	10	32,68	93,67
2015	3	3	12	59,79	105,51
2015	3	3	14	72,01	224,69
2015	3	3	16	51,02	261,86
2015	3	3	18	22,92	269,31
2015	3	4	8	3,86	88,32
2015	3	4	10	32,84	94,13
2015	3	4	12	60,06	106,36
2015	3	4	14	72,36	222,83
2015	3	4	16	51,14	261,21
2015	3	4	18	22,96	268,88
2015	3	5	8	3,99	88,69
2015	3	5	10	33,01	94,59
2015	3	5	12	60,32	107,20
2015	3	5	14	72,72	221,05
2015	3	5	16	51,25	260,55
2015	3	5	18	23,01	268,44
2015	3	6	8	4,12	89,07
2015	3	6	10	33,17	95,05
2015	3	6	12	60,58	108,02

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	3	6	14	73,07	219,36
2015	3	6	16	51,36	259,90
2015	3	6	18	23,04	268,01
2015	3	7	8	4,25	89,44
2015	3	7	10	33,34	95,51
2015	3	7	12	60,84	108,83
2015	3	7	14	73,42	217,74
2015	3	7	16	51,47	259,24
2015	3	7	18	23,08	267,57
2015	3	8	8	4,39	89,82
2015	3	8	10	33,50	95,97
2015	3	8	12	61,10	109,63
2015	3	8	14	73,77	216,20
2015	3	8	16	51,57	258,58
2015	3	8	18	23,11	267,14
2015	3	9	8	4,52	90,19
2015	3	9	10	33,67	96,42
2015	3	9	12	61,36	110,42
2015	3	9	14	74,11	214,73
2015	3	9	16	51,67	257,92
2015	3	9	18	23,14	266,70
2015	3	10	8	4,66	90,57
2015	3	10	10	33,84	96,88
2015	3	10	12	61,61	111,20
2015	3	10	14	74,46	213,33
2015	3	10	16	51,76	257,26
2015	3	10	18	23,17	266,26
2015	3	11	8	4,79	90,95
2015	3	11	10	34,00	97,33
2015	3	11	12	61,87	111,97
2015	3	11	14	74,80	212,00
2015	3	11	16	51,85	256,61
2015	3	11	18	23,20	265,83
2015	3	12	8	4,93	91,32
2015	3	12	10	34,17	97,79

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	3	12	12	62,13	112,72
2015	3	12	14	75,14	210,73
2015	3	12	16	51,93	255,95
2015	3	12	18	23,22	265,39
2015	3	13	8	5,07	91,70
2015	3	13	10	34,34	98,24
2015	3	13	12	62,38	113,47
2015	3	13	14	75,48	209,52
2015	3	13	16	52,01	255,30
2015	3	13	18	23,24	264,95
2015	3	14	8	5,21	92,08
2015	3	14	10	34,50	98,69
2015	3	14	12	62,63	114,20
2015	3	14	14	75,81	208,38
2015	3	14	16	52,09	254,65
2015	3	14	18	23,26	264,51
2015	3	15	8	5,36	92,46
2015	3	15	10	34,67	99,14
2015	3	15	12	62,88	114,92
2015	3	15	14	76,14	207,29
2015	3	15	16	52,16	253,99
2015	3	15	18	23,28	264,08
2015	3	16	8	5,50	92,83
2015	3	16	10	34,83	99,58
2015	3	16	12	63,13	115,63
2015	3	16	14	76,47	206,25
2015	3	16	16	52,23	253,35
2015	3	16	18	23,29	263,64
2015	3	17	8	5,64	93,21
2015	3	17	10	35,00	100,03
2015	3	17	12	63,37	116,32
2015	3	17	14	76,79	205,27
2015	3	17	16	52,29	252,70
2015	3	17	18	23,30	263,20
2015	3	18	8	5,79	93,59

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	3	18	10	35,16	100,47
2015	3	18	12	63,61	117,01
2015	3	18	14	77,11	204,34
2015	3	18	16	52,35	252,06
2015	3	18	18	23,31	262,77
2015	3	19	8	5,93	93,96
2015	3	19	10	35,32	100,91
2015	3	19	12	63,85	117,69
2015	3	19	14	77,43	203,45
2015	3	19	16	52,41	251,42
2015	3	19	18	23,32	262,33
2015	3	20	8	6,07	94,34
2015	3	20	10	35,49	101,35
2015	3	20	12	64,08	118,35
2015	3	20	14	77,73	202,60
2015	3	20	16	52,46	250,78
2015	3	20	18	23,33	261,90
2015	3	21	8	6,22	94,71
2015	3	21	10	35,65	101,79
2015	3	21	12	64,32	119,00
2015	3	21	14	78,03	201,80
2015	3	21	16	52,50	250,15
2015	3	21	18	23,33	261,46
2015	3	22	8	6,37	95,09
2015	3	22	10	35,81	102,23
2015	3	22	12	64,54	119,64
2015	3	22	14	78,33	201,04
2015	3	22	16	52,54	249,52
2015	3	22	18	23,34	261,03
2015	3	23	8	6,51	95,46
2015	3	23	10	35,96	102,66
2015	3	23	12	64,77	120,28
2015	3	23	14	78,62	200,32
2015	3	23	16	52,58	248,90
2015	3	23	18	23,34	260,60

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	3	24	8	6,66	95,83
2015	3	24	10	36,12	103,09
2015	3	24	12	64,99	120,90
2015	3	24	14	78,90	199,63
2015	3	24	16	52,62	248,28
2015	3	24	18	23,34	260,17
2015	3	25	8	6,80	96,21
2015	3	25	10	36,27	103,52
2015	3	25	12	65,20	121,51
2015	3	25	14	79,17	198,98
2015	3	25	16	52,64	247,67
2015	3	25	18	23,34	259,74
2015	3	26	8	6,95	96,58
2015	3	26	10	36,43	103,94
2015	3	26	12	65,42	122,11
2015	3	26	14	79,43	198,36
2015	3	26	16	52,67	247,06
2015	3	26	18	23,34	259,32
2015	3	27	8	7,09	96,95
2015	3	27	10	36,58	104,37
2015	3	27	12	65,62	122,70
2015	3	27	14	79,69	197,77
2015	3	27	16	52,69	246,46
2015	3	27	18	23,33	258,89
2015	3	28	8	7,23	97,31
2015	3	28	10	36,73	104,79
2015	3	28	12	65,82	123,28
2015	3	28	14	79,93	197,21
2015	3	28	16	52,71	245,87
2015	3	28	18	23,33	258,47
2015	3	29	8	7,38	97,68
2015	3	29	10	36,87	105,21
2015	3	29	12	66,02	123,86
2015	3	29	14	80,17	196,68
2015	3	29	16	52,73	245,28

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	3	29	18	23,32	258,05
2015	3	30	8	7,52	98,05
2015	3	30	10	37,02	105,62
2015	3	30	12	66,21	124,42
2015	3	30	14	80,39	196,18
2015	3	30	16	52,74	244,70
2015	3	30	18	23,31	257,64
2015	3	31	8	7,66	98,41
2015	3	31	10	37,16	106,04
2015	3	31	12	66,40	124,97
2015	3	31	14	80,60	195,71
2015	3	31	16	52,75	244,12
2015	3	31	18	23,30	257,22

Apéndice III

Tabla correspondiente a la posición del Sol indicado el mes de Junio, en el cual ocurre el cambio de estación a Solsticio de Verano (21 de Junio).

Tabla 10. Posición (Elevación y Azimut) del Sol mes de Junio.

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACION (grados)	AZIMUT (grados)
2015	6	1	8	11,61	68,43
2015	6	1	10	39,17	68,78
2015	6	1	12	65,76	56,14
2015	6	1	14	75,20	328,87
2015	6	1	16	51,44	293,95
2015	6	1	18	24,00	290,68
2015	6	2	8	11,65	68,51
2015	6	2	10	39,22	68,88
2015	6	2	12	65,83	56,26
2015	6	2	14	75,24	328,55
2015	6	2	16	51,41	293,81
2015	6	2	18	23,95	290,60
2015	6	3	8	11,68	68,61
2015	6	3	10	39,27	68,99
2015	6	3	12	65,91	56,40
2015	6	3	14	75,29	328,22
2015	6	3	16	51,39	293,66
2015	6	3	18	23,90	290,51
2015	6	4	8	11,71	68,71
2015	6	4	10	39,32	69,10
2015	6	4	12	65,99	56,55
2015	6	4	14	75,34	327,87
2015	6	4	16	51,36	293,50
2015	6	4	18	23,86	290,41
2015	6	5	8	11,74	68,81
2015	6	5	10	39,38	69,23
2015	6	5	12	66,08	56,72
2015	6	5	14	75,39	327,51
2015	6	5	16	51,34	293,34
2015	6	5	18	23,81	290,30
2015	6	6	8	11,77	68,93
2015	6	6	10	39,43	69,36
2015	6	6	12	66,16	56,91

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACION (grados)	AZIMUT (grados)
2015	6	6	14	75,46	327,14
2015	6	6	16	51,32	293,16
2015	6	6	18	23,77	290,19
2015	6	7	8	11,80	69,05
2015	6	7	10	39,48	69,50
2015	6	7	12	66,25	57,11
2015	6	7	14	75,52	326,75
2015	6	7	16	51,30	292,97
2015	6	7	18	23,72	290,07
2015	6	8	8	11,82	69,17
2015	6	8	10	39,52	69,65
2015	6	8	12	66,34	57,34
2015	6	8	14	75,60	326,34
2015	6	8	16	51,29	292,77
2015	6	8	18	23,68	289,95
2015	6	9	8	11,84	69,31
2015	6	9	10	39,57	69,81
2015	6	9	12	66,42	57,57
2015	6	9	14	75,68	325,92
2015	6	9	16	51,28	292,57
2015	6	9	18	23,64	289,81
2015	6	10	8	11,87	69,44
2015	6	10	10	39,62	69,98
2015	6	10	12	66,52	57,83
2015	6	10	14	75,76	325,48
2015	6	10	16	51,27	292,35
2015	6	10	18	23,60	289,67
2015	6	11	8	10,66	67,93
2015	6	11	10	38,18	68,30
2015	6	11	12	64,82	55,80
2015	6	11	14	75,59	331,34
2015	6	11	16	52,36	294,76
2015	6	11	18	24,97	291,11
2015	6	12	8	10,72	67,95
2015	6	12	10	38,23	68,31

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACION (grados)	AZIMUT (grados)
2015	6	12	12	64,84	55,77
2015	6	12	14	75,52	331,15
2015	6	12	16	52,30	294,73
2015	6	12	18	24,93	291,10
2015	6	13	8	10,77	67,98
2015	6	13	10	38,27	68,33
2015	6	13	12	64,86	55,75
2015	6	13	14	75,45	330,95
2015	6	13	16	52,24	294,68
2015	6	13	18	24,88	291,08
2015	6	14	8	10,82	68,01
2015	6	14	10	38,31	68,35
2015	6	14	12	64,88	55,74
2015	6	14	14	75,39	330,74
2015	6	14	16	52,19	294,63
2015	6	14	18	24,84	291,06
2015	6	15	8	10,87	68,05
2015	6	15	10	38,36	68,39
2015	6	15	12	64,90	55,76
2015	6	15	14	75,33	330,51
2015	6	15	16	52,13	294,56
2015	6	15	18	24,79	291,03
2015	6	16	8	10,92	68,09
2015	6	16	10	38,40	68,43
2015	6	16	12	64,93	55,78
2015	6	16	14	75,28	330,27
2015	6	16	16	52,08	294,48
2015	6	16	18	24,74	290,99
2015	6	17	8	10,98	68,15
2015	6	17	10	38,45	68,48
2015	6	17	12	64,97	55,82
2015	6	17	14	75,24	330,02
2015	6	17	16	52,02	294,40
2015	6	17	18	24,69	290,94
2015	6	18	8	11,03	68,21

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACION (grados)	AZIMUT (grados)
2015	6	18	10	38,50	68,55
2015	6	18	12	65,00	55,88
2015	6	18	14	75,20	329,75
2015	6	18	16	51,97	294,30
2015	6	18	18	24,65	290,89
2015	6	19	8	11,08	68,27
2015	6	19	10	38,54	68,62
2015	6	19	12	65,04	55,95
2015	6	19	14	75,16	329,47
2015	6	19	16	51,92	294,19
2015	6	19	18	24,60	290,83
2015	6	20	8	11,13	68,35
2015	6	20	10	38,59	68,70
2015	6	20	12	65,08	56,04
2015	6	20	14	75,14	329,18
2015	6	20	16	51,87	294,08
2015	6	20	18	24,55	290,76
2015	6	21	8	11,18	67,92
2015	6	21	10	38,64	68,30
2015	6	21	12	65,13	55,84
2015	6	21	14	75,11	331,51
2015	6	21	16	51,82	294,78
2015	6	21	18	24,50	291,11
2015	6	22	8	11,22	67,92
2015	6	22	10	38,70	68,31
2015	6	22	12	65,18	55,91
2015	6	22	14	75,10	331,67
2015	6	22	16	51,78	294,79
2015	6	22	18	24,45	291,10
2015	6	23	8	11,27	67,92
2015	6	23	10	38,75	68,33
2015	6	23	12	65,23	55,98
2015	6	23	14	75,08	331,82
2015	6	23	16	51,73	294,80
2015	6	23	18	24,40	291,09

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACION (grados)	AZIMUT (grados)
2015	6	24	8	11,32	67,93
2015	6	24	10	38,80	68,35
2015	6	24	12	65,29	56,07
2015	6	24	14	75,08	331,95
2015	6	24	16	51,69	294,79
2015	6	24	18	24,35	291,07
2015	6	25	8	11,36	67,95
2015	6	25	10	38,85	68,39
2015	6	25	12	65,35	56,17
2015	6	25	14	75,08	332,07
2015	6	25	16	51,65	294,76
2015	6	25	18	24,30	291,04
2015	6	26	8	11,41	67,97
2015	6	26	10	38,90	68,43
2015	6	26	12	65,41	56,29
2015	6	26	14	75,08	332,17
2015	6	26	16	51,61	294,73
2015	6	26	18	24,25	291,00
2015	6	27	8	11,45	68,00
2015	6	27	10	38,96	68,49
2015	6	27	12	65,47	56,42
2015	6	27	14	75,10	332,26
2015	6	27	16	51,57	294,69
2015	6	27	18	24,20	290,96
2015	6	28	8	11,49	68,04
2015	6	28	10	39,01	68,55
2015	6	28	12	65,54	56,56
2015	6	28	14	75,11	332,34
2015	6	28	16	51,53	294,64
2015	6	28	18	24,15	290,90
2015	6	29	8	11,53	68,09
2015	6	29	10	39,06	68,62
2015	6	29	12	65,61	56,72
2015	6	29	14	75,14	332,40
2015	6	29	16	51,50	294,57

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACION (grados)	AZIMUT (grados)
2015	6	29	18	24,10	290,85
2015	6	30	8	11,57	68,14
2015	6	30	10	39,12	68,69
2015	6	30	12	65,68	56,89
2015	6	30	14	75,17	332,44
2015	6	30	16	51,47	294,49
2015	6	30	18	24,05	290,78

Apéndice IV

Tabla correspondiente a la posición del Sol indicado el mes de Septiembre, en el cual ocurre el cambio de estación a Equinoccio de Otoño (22 de Septiembre).

Tabla 11. Posición (Elevación y Azimut) del Sol mes de Septiembre.

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	9	1	8	9,38	83,21
2015	9	1	10	38,79	87,77
2015	9	1	12	68,27	94,07
2015	9	1	14	81,69	254,75
2015	9	1	16	52,35	269,82
2015	9	1	18	22,87	274,50
2015	9	2	8	9,40	83,59
2015	9	2	10	38,82	88,25
2015	9	2	12	68,30	95,07
2015	9	2	14	81,50	252,54
2015	9	2	16	52,23	269,24
2015	9	2	18	22,74	274,12
2015	9	3	8	9,42	83,96
2015	9	3	10	38,85	88,73
2015	9	3	12	68,32	96,09
2015	9	3	14	81,30	250,42
2015	9	3	16	52,10	268,67
2015	9	3	18	22,61	273,74
2015	9	4	8	9,44	84,35
2015	9	4	10	38,89	89,21
2015	9	4	12	68,34	97,11
2015	9	4	14	81,09	248,39
2015	9	4	16	51,97	268,09
2015	9	4	18	22,47	273,35
2015	9	5	8	9,46	84,73
2015	9	5	10	38,92	89,69
2015	9	5	12	68,35	98,13
2015	9	5	14	80,87	246,44
2015	9	5	16	51,84	267,52
2015	9	5	18	22,34	272,97
2015	9	6	8	9,48	85,11
2015	9	6	10	38,95	90,18
2015	9	6	12	68,35	99,17

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	9	6	14	80,63	244,58
2015	9	6	16	51,70	266,94
2015	9	6	18	22,20	272,59
2015	9	7	8	9,50	85,50
2015	9	7	10	38,98	90,67
2015	9	7	12	68,35	100,20
2015	9	7	14	80,38	242,81
2015	9	7	16	51,55	266,37
2015	9	7	18	22,06	272,20
2015	9	8	8	9,52	85,89
2015	9	8	10	39,00	91,17
2015	9	8	12	68,35	101,25
2015	9	8	14	80,12	241,12
2015	9	8	16	51,41	265,80
2015	9	8	18	21,91	271,82
2015	9	9	8	9,54	86,28
2015	9	9	10	39,03	91,66
2015	9	9	12	68,33	102,29
2015	9	9	14	79,86	239,52
2015	9	9	16	51,26	265,23
2015	9	9	18	21,77	271,43
2015	9	10	8	9,57	86,67
2015	9	10	10	39,05	92,16
2015	9	10	12	68,32	103,34
2015	9	10	14	79,58	237,99
2015	9	10	16	51,10	264,66
2015	9	10	18	21,62	271,04
2015	9	11	8	9,59	87,07
2015	9	11	10	39,08	92,66
2015	9	11	12	68,29	104,39
2015	9	11	14	79,29	236,54
2015	9	11	16	50,94	264,10
2015	9	11	18	21,47	270,66
2015	9	12	8	9,61	87,46
2015	9	12	10	39,10	93,16

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	9	12	12	68,26	105,45
2015	9	12	14	79,00	235,16
2015	9	12	16	50,78	263,53
2015	9	12	18	21,32	270,27
2015	9	13	8	9,63	87,86
2015	9	13	10	39,11	93,67
2015	9	13	12	68,22	106,50
2015	9	13	14	78,70	233,84
2015	9	13	16	50,62	262,97
2015	9	13	18	21,17	269,88
2015	9	14	8	9,65	88,26
2015	9	14	10	39,13	94,18
2015	9	14	12	68,17	107,55
2015	9	14	14	78,40	232,59
2015	9	14	16	50,45	262,41
2015	9	14	18	21,02	269,49
2015	9	15	8	9,67	88,66
2015	9	15	10	39,15	94,68
2015	9	15	12	68,12	108,60
2015	9	15	14	78,09	231,40
2015	9	15	16	50,28	261,85
2015	9	15	18	20,86	269,10
2015	9	16	8	9,69	89,06
2015	9	16	10	39,16	95,19
2015	9	16	12	68,06	109,65
2015	9	16	14	77,77	230,27
2015	9	16	16	50,10	261,30
2015	9	16	18	20,71	268,71
2015	9	17	8	9,71	89,46
2015	9	17	10	39,17	95,70
2015	9	17	12	68,00	110,69
2015	9	17	14	77,45	229,20
2015	9	17	16	49,93	260,75
2015	9	17	18	20,55	268,33
2015	9	18	8	9,73	89,86

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	9	18	10	39,18	96,22
2015	9	18	12	67,93	111,73
2015	9	18	14	77,12	228,17
2015	9	18	16	49,75	260,20
2015	9	18	18	20,39	267,94
2015	9	19	8	9,75	90,27
2015	9	19	10	39,18	96,73
2015	9	19	12	67,85	112,77
2015	9	19	14	76,79	227,19
2015	9	19	16	49,56	259,65
2015	9	19	18	20,23	267,55
2015	9	20	8	9,76	90,67
2015	9	20	10	39,18	97,24
2015	9	20	12	67,76	113,80
2015	9	20	14	76,46	226,26
2015	9	20	16	49,38	259,11
2015	9	20	18	20,07	267,16
2015	9	21	8	9,78	91,07
2015	9	21	10	39,18	97,76
2015	9	21	12	67,67	114,82
2015	9	21	14	76,12	225,37
2015	9	21	16	49,19	258,57
2015	9	21	18	19,91	266,77
2015	9	22	8	9,79	91,48
2015	9	22	10	39,18	98,27
2015	9	22	12	67,57	115,83
2015	9	22	14	75,78	224,52
2015	9	22	16	49,00	258,04
2015	9	22	18	19,75	266,38
2015	9	23	8	9,81	91,88
2015	9	23	10	39,18	98,79
2015	9	23	12	67,46	116,84
2015	9	23	14	75,43	223,71
2015	9	23	16	48,81	257,50
2015	9	23	18	19,59	266,00

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	9	24	8	9,82	92,29
2015	9	24	10	39,17	99,30
2015	9	24	12	67,35	117,84
2015	9	24	14	75,09	222,93
2015	9	24	16	48,61	256,98
2015	9	24	18	19,43	265,61
2015	9	25	8	9,84	92,69
2015	9	25	10	39,16	99,81
2015	9	25	12	67,23	118,82
2015	9	25	14	74,74	222,18
2015	9	25	16	48,42	256,45
2015	9	25	18	19,26	265,22
2015	9	26	8	9,85	93,10
2015	9	26	10	39,14	100,33
2015	9	26	12	67,10	119,80
2015	9	26	14	74,39	221,47
2015	9	26	16	48,22	255,93
2015	9	26	18	19,10	264,84
2015	9	27	8	9,86	93,50
2015	9	27	10	39,13	100,84
2015	9	27	12	66,97	120,76
2015	9	27	14	74,03	220,78
2015	9	27	16	48,02	255,41
2015	9	27	18	18,94	264,45
2015	9	28	8	9,87	93,91
2015	9	28	10	39,08	101,35
2015	9	28	12	66,68	121,71
2015	9	28	14	73,33	220,12
2015	9	28	16	47,62	254,90
2015	9	28	18	18,62	264,07
2015	9	29	8	9,87	94,31
2015	9	29	10	39,08	101,87
2015	9	29	12	66,68	122,65
2015	9	29	14	73,33	219,48
2015	9	29	16	47,62	254,39

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	9	29	18	18,62	263,68
2015	9	30	8	9,88	94,71
2015	9	30	10	39,06	102,38
2015	9	30	12	66,53	123,57
2015	9	30	14	72,97	218,87
2015	9	30	16	47,42	253,88
2015	9	30	18	18,46	263,30

Apéndice V

Tabla correspondiente a la posición del Sol indicado el mes de Diciembre, en el cual ocurre el cambio de estación a Solsticio de Invierno (21 de Diciembre).

Tabla 12. Posición (Elevación y Azimut) del Sol mes de Diciembre.

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	12	1	8	2,58	113,52
2015	12	1	10	28,54	124,13
2015	12	1	12	49,77	149,91
2015	12	1	14	55,65	198,21
2015	12	1	16	40,36	230,89
2015	12	1	18	16,08	244,33
2015	12	2	8	2,67	113,65
2015	12	2	10	28,61	124,24
2015	12	2	12	49,78	149,92
2015	12	2	14	55,56	197,97
2015	12	2	16	40,23	230,67
2015	12	2	18	15,95	244,15
2015	12	3	8	2,77	113,77
2015	12	3	10	28,68	124,33
2015	12	3	12	49,80	149,92
2015	12	3	14	55,48	197,74
2015	12	3	16	40,10	230,45
2015	12	3	18	15,83	243,99
2015	12	4	8	2,87	113,88
2015	12	4	10	28,75	124,42
2015	12	4	12	49,82	149,91
2015	12	4	14	55,40	197,51
2015	12	4	16	39,98	230,24
2015	12	4	18	15,70	243,82
2015	12	5	8	2,97	113,99
2015	12	5	10	28,83	124,50
2015	12	5	12	49,84	149,90
2015	12	5	14	55,32	197,27
2015	12	5	16	39,86	230,03
2015	12	5	18	15,58	243,67
2015	12	6	8	3,07	114,09
2015	12	6	10	28,91	124,58
2015	12	6	12	49,88	149,87

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	12	6	14	55,26	197,04
2015	12	6	16	39,75	229,84
2015	12	6	18	15,46	243,52
2015	12	7	8	3,17	114,18
2015	12	7	10	29,00	124,64
2015	12	7	12	49,92	149,83
2015	12	7	14	55,20	196,82
2015	12	7	16	39,64	229,64
2015	12	7	18	15,34	243,38
2015	12	8	8	3,28	114,26
2015	12	8	10	29,09	124,70
2015	12	8	12	49,96	149,79
2015	12	8	14	55,15	196,59
2015	12	8	16	39,54	229,46
2015	12	8	18	15,23	243,24
2015	12	9	8	3,39	114,34
2015	12	9	10	29,18	124,74
2015	12	9	12	50,01	149,74
2015	12	9	14	55,11	196,37
2015	12	9	16	39,44	229,28
2015	12	9	18	15,11	243,11
2015	12	10	8	3,50	114,40
2015	12	10	10	29,28	124,78
2015	12	10	12	50,07	149,68
2015	12	10	14	55,07	196,14
2015	12	10	16	39,34	229,10
2015	12	10	18	15,00	242,99
2015	12	11	8	3,61	114,46
2015	12	11	10	29,38	124,81
2015	12	11	12	50,14	149,61
2015	12	11	14	55,04	195,92
2015	12	11	16	39,25	228,94
2015	12	11	18	14,89	242,87
2015	12	12	8	3,72	114,52
2015	12	12	10	29,49	124,83

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	12	12	12	50,21	149,54
2015	12	12	14	55,02	195,71
2015	12	12	16	39,16	228,78
2015	12	12	18	14,79	242,76
2015	12	13	8	3,84	114,56
2015	12	13	10	29,60	124,84
2015	12	13	12	50,28	149,46
2015	12	13	14	55,00	195,49
2015	12	13	16	39,08	228,62
2015	12	13	18	14,68	242,66
2015	12	14	8	3,95	114,60
2015	12	14	10	29,71	124,85
2015	12	14	12	50,37	149,37
2015	12	14	14	55,00	195,28
2015	12	14	16	39,01	228,48
2015	12	14	18	14,58	242,57
2015	12	15	8	4,07	114,63
2015	12	15	10	29,82	124,84
2015	12	15	12	50,45	149,27
2015	12	15	14	55,00	195,07
2015	12	15	16	38,94	228,34
2015	12	15	18	14,49	242,48
2015	12	16	8	4,19	114,07
2015	12	16	10	29,94	123,70
2015	12	16	12	50,55	146,78
2015	12	16	14	55,00	192,07
2015	12	16	16	38,87	227,11
2015	12	16	18	14,39	242,08
2015	12	17	8	4,31	114,16
2015	12	17	10	30,06	123,83
2015	12	17	12	50,65	146,98
2015	12	17	14	55,02	192,24
2015	12	17	16	38,81	227,13
2015	12	17	18	14,30	242,05
2015	12	18	8	4,43	114,24

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	12	18	10	30,18	123,95
2015	12	18	12	50,76	147,18
2015	12	18	14	55,04	192,40
2015	12	18	16	38,75	227,15
2015	12	18	18	14,21	242,03
2015	12	19	8	4,55	114,32
2015	12	19	10	30,31	124,06
2015	12	19	12	50,87	147,37
2015	12	19	14	55,07	192,57
2015	12	19	16	38,70	227,19
2015	12	19	18	14,13	242,01
2015	12	20	8	4,67	114,39
2015	12	20	10	30,44	124,17
2015	12	20	12	50,99	147,55
2015	12	20	14	55,10	192,75
2015	12	20	16	38,66	227,23
2015	12	20	18	14,05	242,00
2015	12	21	8	4,79	114,45
2015	12	21	10	30,57	124,27
2015	12	21	12	51,11	147,73
2015	12	21	14	55,15	192,92
2015	12	21	16	38,62	227,28
2015	12	21	18	13,97	242,00
2015	12	22	8	4,91	114,50
2015	12	22	10	30,70	124,36
2015	12	22	12	51,24	147,90
2015	12	22	14	55,20	193,10
2015	12	22	16	38,58	227,34
2015	12	22	18	13,90	242,00
2015	12	23	8	5,04	114,55
2015	12	23	10	30,84	124,44
2015	12	23	12	51,37	148,07
2015	12	23	14	55,25	193,29
2015	12	23	16	38,55	227,40
2015	12	23	18	13,82	242,02

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	12	24	8	5,16	114,59
2015	12	24	10	30,98	124,52
2015	12	24	12	51,51	148,23
2015	12	24	14	55,32	193,47
2015	12	24	16	38,53	227,48
2015	12	24	18	13,76	242,04
2015	12	25	8	5,28	114,62
2015	12	25	10	31,12	124,59
2015	12	25	12	51,66	148,38
2015	12	25	14	55,39	193,66
2015	12	25	16	38,51	227,56
2015	12	25	18	13,69	242,07
2015	12	26	8	5,40	114,64
2015	12	26	10	31,26	124,65
2015	12	26	12	51,81	148,53
2015	12	26	14	55,47	193,85
2015	12	26	16	38,49	227,65
2015	12	26	18	13,63	242,11
2015	12	27	8	5,53	114,65
2015	12	27	10	31,40	124,83
2015	12	27	12	51,96	149,16
2015	12	27	14	55,56	194,86
2015	12	27	16	38,49	228,20
2015	12	27	18	13,58	242,40
2015	12	28	8	5,65	114,66
2015	12	28	10	31,55	124,70
2015	12	28	12	52,12	148,67
2015	12	28	14	55,65	194,05
2015	12	28	16	38,48	227,74
2015	12	28	18	13,53	242,15
2015	12	29	8	5,77	114,07
2015	12	29	10	31,69	123,70
2015	12	29	12	52,29	146,78
2015	12	29	14	55,75	192,07
2015	12	29	16	38,49	227,11

Año	Mes	Día	Hora	ELEVACIÓN (grados)	AZIMUT (grados)
2015	12	29	18	13,48	242,08
2015	12	30	8	5,89	114,16
2015	12	30	10	31,84	123,83
2015	12	30	12	52,46	146,98
2015	12	30	14	55,85	192,24
2015	12	30	16	38,49	227,13
2015	12	30	18	13,44	242,05
2015	12	31	8	6,01	114,24
2015	12	31	10	31,99	123,95
2015	12	31	12	52,63	147,18
2015	12	31	14	55,97	192,40
2015	12	31	16	38,51	227,15
2015	12	31	18	13,40	242,03

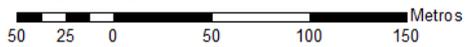
Apéndice VI

Producto Cartográfico obtenido con la digitalización de cartografía básica, Modelo Digital de Superficie (MDS) y la ortofoto, necesario para el desarrollo del trabajo.

TECHOS ACTUALIZADOS DE LA CARTOGRAFÍA BÁSICA



Escala 1:2.500



Techos de la Zona

Techos

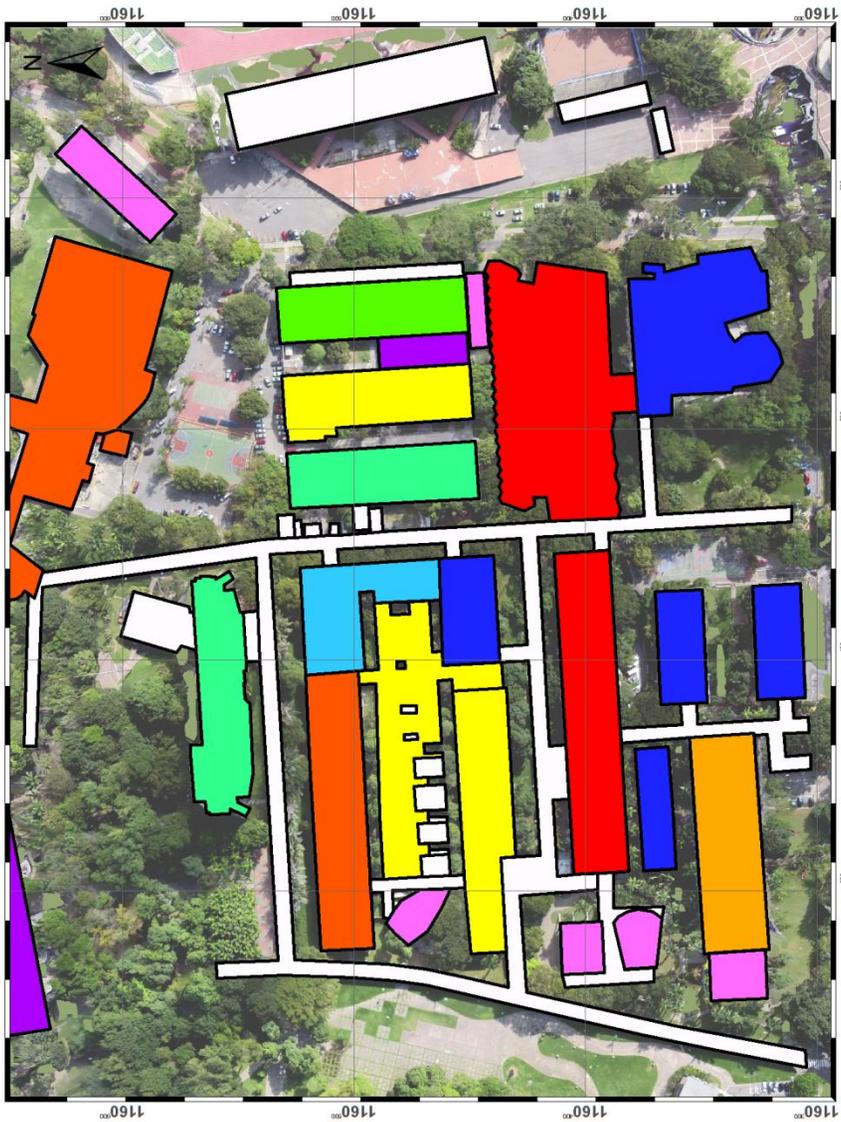
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 19N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500,000,0000
False Northing: 0,0000
Central Meridian: -69,0000
Scale Factor: 0,9996
Latitude Of Origin: 0,0000
Units: Meter

Apéndice VII

Producto Cartográfico Obtenido: Clasificación de las superficies de los techos potencialmente disponibles en las edificaciones para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos.

ÁREA DISPONIBLE EN LOS TECHOS POR EDIFICIOS

Ubicación Relativa
Ciudad Universitaria
Caracas - Venezuela



Área Disponible (m ²)	
[White]	0,00
[Pink]	0,01 - 258,40
[Purple]	258,41 - 516,81
[Blue]	516,82 - 775,21
[Light Blue]	775,22 - 1.033,62
[Green]	1.033,63 - 1.292,02
[Light Green]	1.292,03 - 1.550,43
[Yellow]	1.550,44 - 1.808,83
[Orange]	1.808,84 - 2.325,64
[Red-Orange]	2.325,65 - 2.584,05
[Red]	2.584,06 - 2.842,45
[White with border]	Contorno de Techos



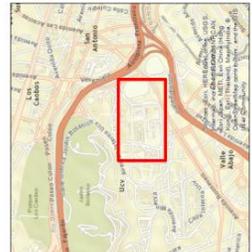
Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 19N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 False Easting: 500.000.0000
 False Northing: 0,0000
 Central Meridian: -69,0000
 Scale Factor: 0,9996
 Latitude Of Origin: 0,0000
 Units: Meter

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA	
Elaborado por:	Ana Gabriela Pérez Cáceres
Revisado por:	Prof. Julián García
Superficies de los techos disponibles en las edificaciones para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos	
Escala del mapa:	1: 1.000
Fecha:	Julio de 2016
Hoja:	1 de 1

ÁREA DISPONIBLE EN LOS TECHOS POR EDIFICIOS



Ubicación Relativa
Ciudad Universitaria
Caracas - Venezuela



Área Disponible (m ²)	
	58,64 - 77,41
	77,42 - 94,74
	94,75 - 160,70
	160,71 - 235,43
	235,44 - 577,07
	577,08 - 1057,29
	1057,30 - 1735,62
	1735,63 - 2677,75
	2677,76 - 6112,11
	6112,12 - 7534,67
	Contorno de Techos



Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 19N
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: WGS 1984
 False Easting: 500.000.0000
 False Northing: 0.0000
 Central Meridian: -69.0000
 Scale Factor: 0.9996
 Latitude Of Origin: 0.0000
 Units: Meter

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA	
Elaborado por: Ana Gabriela Pérez Cáceres	Superficies de los techos disponibles en las edificaciones para la instalación de sistemas solares fotovoltaicos
Revisado por: Prof. Julián García	Fecha: Julio de 2016
Escala del mapa: 1:1.000	Hoja: 1 de 1