

PROYECTO FIN DE MÁSTER

DETERMINACIÓN CON TECNOLOGÍAS S.I.G. DE LA RADIACIÓN SOLAR  
DE EDIFICIOS EN ZONAS URBANAS DE ÁVILA, ESPAÑA

DESARROLLADO POR:

FRANKLIN ANDRÉS MENDOZA CASTAÑEDA

DIRECTOR(ES): INMACULADA PICÓN / ÁNGEL L. MUÑOZ

MÁSTER EN GEOTECNOLOGÍAS CARTOGRÁFICAS EN INGENIERÍA Y  
ARQUITECTURA

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ÁVILA

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA - UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

JUNIO DE 2015

## TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS .....	4
3. MATERIALES EMPLEADOS.....	5
4. MARCO TEÓRICO .....	6
4.1 Conceptos y métodos numéricos de los modelos solares computacionales.....	7
4.2 Modelos para la obtención del potencial solar en centro urbanos .....	13
4.2.1 Modelos todos en uno.....	14
4.2.2 Modelos basados en Plug-in para CAD .....	16
4.2.3 Modelos basados en Sistemas de Información Geográfica.....	17
4.2.4 Modelos basados en Web.....	20
5. DESARROLLO METODOLÓGICO.....	23
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	37
6.1 Caso Particular: comparación del modelo original (Zona 1) con el modelo depurado de (Zona 1A) .....	49
6.2 Proyección de Sombras para las zonas de estudio .....	55
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	58
8. BIBLIOGRAFÍA .....	63

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1- Pasos y opciones involucradas en la evaluación del potencial solar para cierto lugar (Freitas et al., 2014).....	6
Figura 2 - Zonas de estudio para el cálculo de la radiación sola .....	24
Figura 3 - Tipos de tejados representados .....	26
Figura 4 - Entorno de CityEngine 2014 .....	26
Figura 5 - Representación 3D de la Zona 1 .....	27
Figura 6 - Representación 3D de la Zona 2.....	27
Figura 7 - Representación 3D de la Zona 3.....	28
Figura 8 - Representación 3D de la Zona 4.....	28
Figura 9 - Resultado de la simplificación de las huellas de las edificaciones .....	29
Figura 10 - Representación 3D de la Zona 1 (Datos originales) .....	30
Figura 11 - Representación 3D de la Zona 1A (Datos generalizados).....	31
Figura 12 - Representación de una máscara de ensombrecimiento (shading mask) .....	33
Figura 13 - Representación datos climáticos del casco urbano de Ávila, España .....	35
Figura 14 - Importar a Autodesk Ecotect un modelo tridimensional en formato .OBJ .....	35
Figura 15 - Radiación solar total para cada una de las épocas del año .....	39
Figura 16 - Radiación solar directa para cada una de las épocas del año .....	40
Figura 17 - Radiación solar difusa para cada una de las épocas del año .....	40
Figura 18 - Radiación Total calculada para primavera en la Zona 1.....	41
Figura 19 - Radiación Total calculada para verano en la Zona 1.....	42
Figura 20 - Radiación Total calculada para otoño en la Zona 1.....	42
Figura 21 - Radiación Total calculada para invierno en la Zona 1 .....	43
Figura 22 - Radiación Total calculada para la primavera en la Zona 2 .....	43
Figura 23 - Radiación Total calculada para verano en la Zona 2.....	44
Figura 24 - Radiación Total calculada para otoño en la Zona 2.....	44
Figura 25 - Radiación Total calculada para invierno en la Zona 2.....	45
Figura 26 - Radiación Total calculada para primavera en la Zona 3.....	45
Figura 27 - Radiación Total calculada para verano en la Zona 3.....	46
Figura 28 - Radiación Total calculada para otoño en la Zona 3.....	46
Figura 29 - Radiación Total calculada para invierno en la Zona 3 .....	47
Figura 30 - Radiación Total calculada para primavera en la Zona 4.....	47
Figura 31 - Radiación Total calculada para verano en la Zona 4.....	48
Figura 32 - Radiación Total calculada para otoño en la Zona 4.....	48
Figura 33 - Radiación Total calculada para invierno en la Zona 4 .....	49
Figura 34 - Comparación de la radiación solar total entre Zona 1 y Zona 1A .....	50
Figura 35 - Comparación de la radiación solar directa entre Zona 1 y Zona 1A .....	52
Figura 36 - Comparación de la radiación solar difusa entre Zona 1 y Zona 1 <sup>a</sup> .....	52
Figura 37 - Radiación Total calculada para primavera en la Zona 1A.....	53
Figura 38 - Radiación Total calculada para verano en la Zona 1A.....	53
Figura 39 - Radiación Total calculada para otoño en la Zona 1A.....	54
Figura 40 - Radiación Total calculada para invierno en la Zona 1A.....	54
Figura 41 - Proyección de sombras en la Zona 1 entre las 09:00 - 17:00 en Julio 15.....	56

Figura 42 – Proyección de sombras en la Zona 2 entre las 09:00 – 17:00 en Julio 15.....	56
Figura 43 – Proyección de sombras en la Zona 3 entre las 09:00 – 17:00 en Julio 15.....	57
Figura 44 – Proyección de sombras en la Zona 4 entre las 09:00 – 17:00 en Julio 15.....	57

## **LISTADO DE TABLAS**

Tabla 1 - Radiación Total, Directa y Difusa calculada para la Zona 1 .....	37
Tabla 2 - Radiación Total, Directa y Difusa calculada para la Zona 2 .....	37
Tabla 3 - Radiación Total, Directa y Difusa calculada para la Zona 3 .....	38
Tabla 4 - Radiación Total, Directa y Difusa calculada para la Zona 4 .....	38
Tabla 5 - Radiación Total, Directa y Difusa calculada para la Zona 1A .....	49

## 1. INTRODUCCIÓN

En el marco de la caracterización de las dinámicas poblacionales alrededor del mundo, se ha estimado que más del 75% del total de habitantes desarrollan sus principales actividades en entornos urbanos, donde el consumo energético alcanza hasta el 80% de la producción neta de energía; de esta manera se conforman núcleos urbanos que emiten más de la mitad de los gases efecto invernadero generados en toda la superficie terrestre (Tadi, Lobaccaro, & Vahabzadeh, 2012).

Lo anterior hace que deba planear a mediano y largo plazo el consumo energético, previendo el crecimiento de la población, de allí que diversos países desarrollados, conociendo la importancia del sector de la construcción dentro de sus economías, siguiendo los estándares y reglas establecidas por la Unión Europea, encaminadas hacia el cumplimiento del Protocolo de Kyoto (United Nations, 1997) y el objetivo 20-20-20 (EP, 2009), ha definido acciones para alcanzar un uso más racional de la energía, así como una producción más limpia de la misma, recurriendo de esta manera a las energías renovables (De Filippis & Scarano, 2010; del Río Gonzales, Hernández, & Gual, 2005; Viquier, Babiker, & Reilly, 2003).

A su vez, las Directivas Europeas de Desempeño Energético de las Edificaciones (EPDB) se han trazado la meta de construir edificios de energía neta cero para el año 2020 (Lobaccaro & Frontini, 2014), esto significa llevar a cabo las adecuaciones necesarias en las antiguas edificaciones, así como garantizar que las nuevas sean energéticamente eficientes en mayor proporción aprovechando las ventajas de las energías renovables, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles, y por ende la generación de gases efecto invernadero.

Partiendo de este panorama, se genera la necesidad de optimizar el consumo energético en los centros urbanos, de tal manera que busquen un desarrollo sostenible a través del uso de fuentes energéticas limpias, con el fin de garantizar una calidad de vida adecuada para todos sus habitantes (La Genusa, Lascari, Rizzo, Scaccianoce, & Sorrentino, 2011).

Una de las fuentes de energía limpia renovable más abundante es la radiación solar, la cual se abre espacio gracias a que la optimización tecnológica ha reducido sus costos asociados, junto a una gran acogida por parte de las comunidades humanas (Freitas, Catita, Redweik, & Brito, 2014). Siendo los entornos urbanos los espacios de mayor demanda energética, resulta de gran interés el empleo de colectores fotovoltaicos (i.e. PV por sus siglas en inglés) y colectores térmicos solares (i.e. ST), los cuales son principalmente modulares, y permiten distribuir la electricidad y producción de calor. Esto último es clave para alcanzar el objetivo de los edificios de energía neta cero, basado en la autonomía que alcanzan las edificaciones de las redes eléctricas, vinculando fuentes energéticas variadas más allá de la solar, como por ejemplo aprovechando la ventilación natural e iluminación del día para evitar recurrir a sistema de aire acondicionado o calefacción, lo que incrementa el desempeño energético de los edificios (Marszal et al., 2011).

Las principales ventajas técnicas ofrecidas por las tecnologías que se basan en sistemas fotovoltaicos y térmicos solares se relacionan a continuación (La Genusa et al., 2011):

- Poco mantenimiento requerido
- Reducido impacto acústico sobre el entorno inmediato, ante la ausencia de mecanismos en movimiento o vibraciones
- Ausencia de impactos negativos al medio ambiente durante el ciclo de funcionamiento
- Instalación sencilla de los módulos, siendo en algunos casos asimilables como fachadas o tejados en algunos casos
- Fácil conexión a la red eléctrica local de los sistemas fotovoltaicos

No obstante lo anterior, en ocasiones la configuración espacial de las urbes no es la mejor principalmente por la limitada cantidad de espacio disponible, lo que repercute directamente sobre la disponibilidad de luz solar, afectando la eventual potencialidad solar de un área (Freitas et al., 2014).

De acuerdo a los intereses particulares de cada caso, así como el nivel de detalle necesario, existen diversas metodologías de trabajo para estimar el potencial solar, ya sea a pequeña o gran escala, donde se vinculan variables adicionales como las sombras, y superficies verticales de las edificaciones (Freitas et al., 2014). En la actualidad, gracias al desarrollo de los ordenadores y técnicas de modelamiento, es posible estimar el potencial solar en armonía con la escala de trabajo, donde pequeñas escalas (Autodesk, 2010; Skelion, 2013) son abordadas por programas de diseño asistido por computador (i.e. CAD), y grandes escalas con la ayuda de Sistemas de Información Geográfica (i.e. G.I.S.). La evaluación del potencial de energía solar a través del mapeado, se convierte en una herramienta analítica clave al momento de definir las capacidades locales o particulares de generar energía, todo esto con el fin de diseñar estrategias de planeación energética adecuadas a las particularidades de cada zona (Santos et al., 2014).

El consumo energético de ciertas edificaciones puede estar relacionado con la forma geométrica de la misma, afectando el rendimiento térmico y la captura de energía solar (Hachem, Athienitis, & Fazio, 2011a; Hachem, Athienitis, & Fazio, 2011b). A su vez, las características morfológicas de los vecindarios, así como las regulaciones de uso del suelo pueden contribuir a la demanda energética de las edificaciones (Kim, 2009). Los desarrollos urbanos con alta densidad reducen costos y uso energético, mientras que reduce el acceso a la energía solar (Steemers, 2003). Finalmente, la forma de los lugares, y el trazado de las vías en cierto vecindario pueden determinar la orientación de las edificaciones, repercutiendo en la accesibilidad a la radiación solar (Knowles, 1981).

Con base en lo anterior, se hace necesario evaluar un método que permita la determinación de la radiación solar (total, directa y difusa) sobre edificaciones, incluyendo tejados y fachadas, partiendo de las ventajas ofrecidas por los Sistemas de Información Geográfica (i.e. SIG) y los programas de diseño asistido por computador (i.e. CAD), para de esta manera obtener los productos base requeridos por autoridades locales para la toma de decisiones en cuanto al potencial de los sistemas de aprovechamiento del recurso solar.

## 2. OBJETIVOS

### - Objetivo General:

Analizar modelos de fácil aplicación con sistemas de información geográfica y programas de diseño asistido por computador, para la determinación de la radiación solar de edificios, a través del desarrollo de un estudio de caso particular para cuatro zonas morfológicas edificadas al interior de la ciudad de Ávila, con el fin de evaluar el potencial de la radiación total, directa y difusa en la posterior toma de decisiones para su aprovechamiento como una fuente energética alternativa limpia.

### - Objetivos Específicos:

- Identificar los principales modelos de cálculo de la radiación solar en edificios
- Definir un modelo aplicable que permita emplear los Sistemas de Información Geográfica y Programas de Diseño Asistido por Computador
- Desarrollar un caso de estudio particular en donde se consideren diferentes unidades morfológicas de la distribución y uso de las edificaciones para la ciudad de Ávila
- Calcular la radiación solar total, directa y difusa sobre las fachadas y tejados de las edificaciones escogidas como unidades morfológicas
- Determinar el comportamiento de las sombras proyectadas sobre las edificaciones a lo largo del día, de acuerdo a los períodos de estudio definidos



### 3. MATERIALES EMPLEADOS

Conforme a la revisión previa de los modelos que permiten el cálculo de la radiación solar sobre edificaciones, realizada sobre las publicaciones científicas de los últimos cinco años y de acuerdo a los objetivos trazados, en donde se pretende su aplicación a través de sistemas de información geográfica y programas de diseño asistido por computador, se han definido algunas herramientas claves que se relacionan a continuación:

- ArcGIS (versión 10.2.2): plataforma GIS que cuenta con herramientas propias para la manipulación y procesamiento de datos a gran escala en diversos formatos, que para el caso específico de interés será principalmente información secundaria proveniente de organismos oficiales españoles, de la cual se alimenta el modelo. Software propiedad de ESRI.
- CityEngine 2014: herramienta para la planeación urbana, arquitectura y diseño. Permite la generación de modelos tridimensionales de ciudades o edificaciones de forma eficiente, partiendo de reglas que describen de forma abstracta la geometría tridimensional de los objetos de la escena bajo estudio. Software propiedad de ESRI.
- Autodesk Ecotect Analysis 2011: herramienta para el análisis ambiental de las edificaciones, que permite la simulación de su desempeño energético partiendo desde etapas iniciales del diseño de las mismas. Combina funciones de análisis con una visualización interactiva que muestra los resultados analíticos directamente en el entorno del modelo de la edificación. No obstante lo anterior, otras herramientas serán mencionadas a lo largo del desarrollo del presente documento.

El computo de los modelos matemáticos que calculan la radiación solar y sombras sobre las edificaciones, requieren de ordenadores con características sobresalientes para conseguir resultados de alta precisión. Es por esto que se ha empleado un ordenador propiedad de la Universidad de Salamanca y en específico de la Escuela Politécnica Superior de Ávila, el cual cuenta con las siguientes especificaciones técnicas: Procesador Intel (R) Xeon (R) E5-2609 @ 2.40 GHz, Memoria RAM: 64 Gb, y Sistema Operativo: Windows 7 Professional (64 Bits).

Este ordenador permitió obtener resultados en tiempos óptimos, facilitando el procesamiento multi-temporal y espacial de los datos.

#### 4. MARCO TEÓRICO

Desde que las morfologías urbanas acogieron las geometrías verticales como su elemento preponderante, los paisajes urbanos configuran un complejo escenario, en donde la radiación solar se distribuye de manera irregular a lo largo y ancho de su extensión. Debido a los efectos dinámicos generados por las sombras sobre las edificaciones, es importante reconocer su ocurrencia, con el fin de mitigar eventuales reducciones en la disponibilidad de la radiación solar (Freitas et al., 2014). Es en este punto, donde se han desarrollado algoritmos numéricos que consideran la radiación, apoyándose en herramientas GIS y CAD, las cuales permiten modelar escenarios complejos a diferentes escalas. El ideal de estos modelos es conseguir un punto medio entre la precisión espacial temporal, y el tiempo computacional requerido para su procesamiento (Freitas et al., 2014).

Generalmente la estimación del potencial solar se realiza en una serie de pasos que se resumen en la Figura 1.

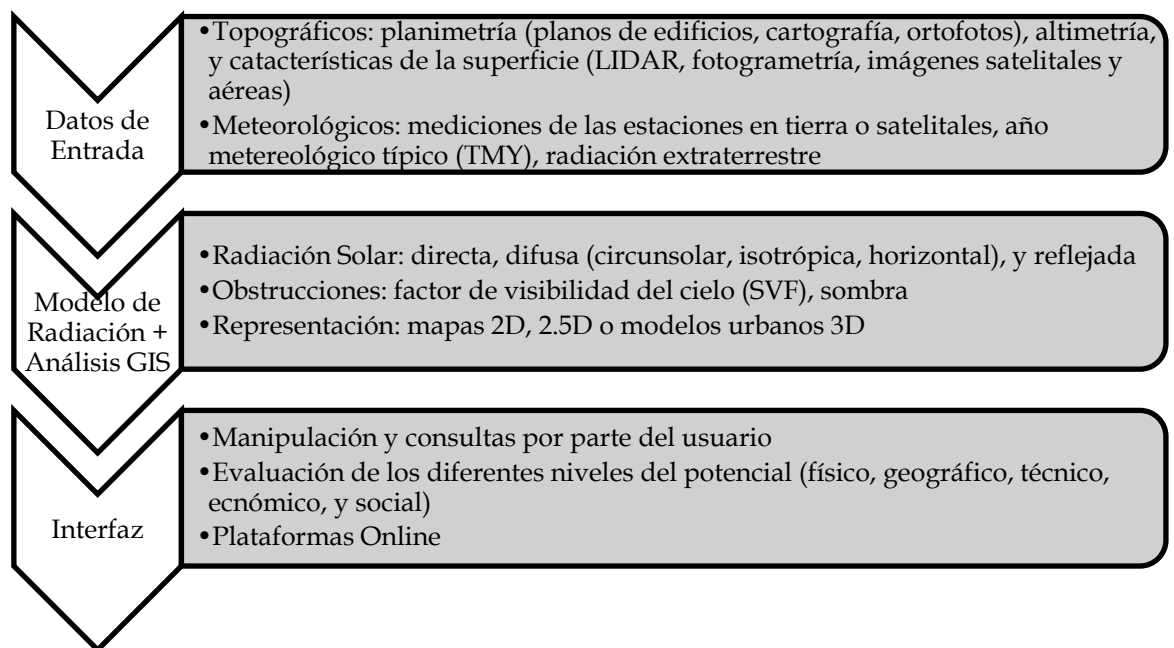


Figura 1- Pasos y opciones involucradas en la evaluación del potencial solar para cierto lugar (Freitas et al., 2014)

Inicialmente es importante conseguir información que contenga las características relevantes de las superficies y sus alrededores, como puede ser a través de modelos de elevación del terreno (i.e. DEM), junto a datos catastrales que permita dar precisión a la reconstrucción tridimensional de la ciudad.

Por otro lado, se debe definir un modelo de radiación solar que permita ser aplicado conforme a la localización y configuración del área de estudio, de acuerdo a observaciones climáticas. Estas últimas deben permitir calcular la radiación para diversas inclinaciones a través de cálculos geométricos en función de la posición del sol. Debido a que la radiación solar depende de la hora, localización y disposición de sombras sobre las superficies objeto de estudio, es importante realizar un análisis de las obstrucciones que pudiesen existir. A continuación se relacionan las características más relevantes de los conceptos y métodos numéricos de radiación solar (Freitas et al., 2014).

#### 4.1 Conceptos y métodos numéricos de los modelos solares computacionales

- GOSOL: software de simulación de viviendas que permite analizar balances de energía sobre superficies, patrones de sombra, traza la ruta del sol, obstrucciones, entre otras opciones. Incluye los efectos que en cierto momento dado puedan tener la vegetación sobre los cálculos de radiación. Diseñado específicamente para viviendas típicas alemanas con un consumo energético restringido (Goretzki, 2013).
- Shadowpack: basado en una plataforma CAD, planteado para facilitar la evaluación de sombras sencillas y su efecto sobre la radiación solar directa sobre superficies, representada como mapas de contornos para cualquier hora del día o año (Peckham, 1990).
- ATM: modelo topográfico y atmosférico, considerado como el primer modelo topográfico solar, que recopila herramientas basadas en UNIX, para procesar ficheros de formato ráster, sin ser aplicado directamente a un GIS (Dubayah, 1992).
- Factor de cielo visible: en inglés denominado como "Sky view factor" (SVF), y establece las obstrucciones resultantes de la autogeneración de sombras por la inclinación del cuerpo de interés u otros objetos cercanos (Dubayah & Rich, 1995). Factor independiente de la hora del día, a excepción de aquellos casos en donde el entorno sea altamente heterogéneo, como suele suceder en los cascos urbanos. El SVF representa el ángulo sólido del hemisferio visible del cielo, normalizado por el ángulo sólido del hemisferio total del cielo

(Littlefair, 1998). El SVF para un punto particular se obtiene conociendo el número de veces que ha sido iluminado (Ratti & Richens, 2004).

- Solei-32: calcula la energía potencial que ingresa con diferentes orientaciones, la radiación solar diaria, duración de la insolación, y hora de salida del sol a partir de la elevación del lugar, nubosidad, albedo, turbiedad, y análisis de sombras para los objetos circundantes. Inicialmente programada para DOS y reescrita para Windows (Fortran) (Freitas et al., 2014).
- SolarFlux: implementado en la plataforma ArcInfo y Grid GIS como un programa ARC Macro Language (AML) que facilita su integración con funciones de los sistemas de información geográfica. Permite calcular la radiación total, directa, y difusa, así como el SVF, y proyecciones ojo de pez de las obstrucciones del cielo, a partir de la elevación, latitud, y transmisión atmosférica (Hetrick, Rich, & Parajka, 1993). Cuenta con una función denominada "hillshade" que permite simular sombreados topográficos, útil para el software CANOPY en el modelamiento de coberturas vegetales (Freitas et al., 2014).
- Modelo Kumar: similar a SolarFlux, enfocado en la radiación directa de onda corta para condiciones de cielo despejado en grandes áreas. Requiere de un modelo digital de elevación, latitud del sitio e intervalo de tiempo. Programa escrito en lenguaje AML, implementado para ArcInfo GIS y Genasys. Considera la radiación difusa como isotrópica y las superficies del terreno como lambertianas, lo que permite conseguir resultados tres veces más rápido en comparación con SolarFlux. Se encontró que los errores del DEM afectan considerablemente la radiación calculada. Permite modificarse para incluir parámetros como tipo de nubes, porcentaje de cobertura, espesor y latitud (Kumar, Hetrick, & Saving, 1997).
- Radiance: aplica el modelo de radiación difusa de Perez (Perez, Ineichen, Seals, Michalsky, & Steward, 1990), considerando las reflexiones difusas y especulares de las edificaciones en centros urbanos. El algoritmo se basa en el comportamiento físico de la luz para un modelo volumétrico tridimensional, incluyendo geometrías curvas complejas. Empleado principalmente para estimar el potencial

solar sobre tejados y fachadas con el fin de generar electricidad y analizar la luz día (Compagnon, 2004). Este software funciona como un plugin en Autodesk Ecotect Analysis.

- Cumulative sky approach: aproximación acumulada del cielo. Método que genera imágenes anuales de radiación a partir de una simulación sencilla (Robinson & Stone, 2004). Desarrollada en lenguaje C. Incluida en el Software Radiance en forma de un módulo denominado GenCumulativeSky. Basado en el esquema de (Tregenza, 1987), y emplea el modelo de Perez para predecir la radiación global en el centroide de los componentes.
- Daysim: software de análisis de la luz día basado en Radiance, que hace uso de un método de coeficiente de luz día basado en el cálculo de trazado de rayos (Mardaljevic, 2000) y el modelo de Perez. Permite obtener un perfil anual de la iluminancia en cada uno de los puntos y construcciones aledañas. Puede emplearse desde Autodesk Ecotect Analysis (Freitas et al., 2014).
- ArcGIS Solar Analyst: desarrollado inicialmente como una extensión de ArcView GIS con lenguaje C++ por ESRI (Fu & Rich, 1999). Requiere como datos de entrada la localización, elevación, orientación, y transmisión atmosférica. El método de radiación se fundamenta en un enfoque geométrico al dividir el cielo en diferentes sectores, los cuales se definen conforme a las coordenadas de acimut y cénit. De esta manera, si se considera un cielo uniformemente nublado (i.e. UOC), con la misma radiación difusa desde todas las direcciones del cielo, o un modelo estándar difuso nublado (i.e. SOC), donde el flujo de la radiación difusa varía con el ángulo del cénit, el modelo calcula una serie de mapas de radiación, que equivalen a una fotografía de ojo de pez, de los cuales analiza la divisoria visual (i.e. viewshed), similar a cómo funcionan los modelos de SolarFlux y Kumar. En general es una herramienta flexible en términos de resolución espacial y temporal (Freitas et al., 2014), de allí que diversos estudios del recurso solar y su disponibilidad sobre tejados, especialmente en la instalación de sistemas fotovoltaicos han empleado esta herramienta (Brito, Gomez, Santos, & Tenedório, 2012; Faessler, 2010; Mendes, 2010; Wiginton, Nguyen, & Pearce, 2010).

- SRAD: modelo encargado de estudiar la radiación circunsolar dentro de los 5° del haz del rayo solar directo y una posición isotrópica del componente difuso, así como un porcentaje medio de nubosidad y un factor de visibilidad del cielo (Wilson & Gallant, 2000). Aborda la pendiente de la zona, el punto de vista, el albedo del suelo, la sombra topográfica y la clasificación de la vegetación para cada píxel de la imagen. SRAD puede calcular los componentes de la radiación de onda corta y larga, la radiación neta, la temperatura del aire y de superficie. Disponible de forma libre para UNIX y Windows.
- Albedo calculator y albedo viewer: conjunto de aplicaciones que permiten simular los albedos en estructuras urbanas tridimensionales, considerando el retorno isotrópico perfecto, a partir de múltiples reflexiones y proyecciones de sombras sobre la cobertura urbana (Chimklai, Hagishima, & Tanimoto, 2004). A su vez la herramienta albedo viewer es un aplicación web que brinda acceso a una base de datos de cálculos de albedo.
- ESRA clear sky model: método de dos alternativas para el cálculo de la radiación a nivel del suelo (Rigollier, Bauer, & Wald, 2000). Consigue abstraer la información a partir de imágenes de satélite. La radiancia del rayo se construye a partir del factor de turbiedad Linke, y la elevación de cada píxel. Realiza técnicas de ajuste de datos en vez de máscaras de sombras. Modelo validado con datos en tierra de estaciones meteorológicas. Codificado en lenguaje C.
- R.Sun: basado en el concepto del método ESRA, pero como un modelo GIS en la herramienta GRASS (Hofierka, 1997) y posteriormente optimizado para superar las limitaciones de los modelos Solei-32, SolarFlux, SolarAnalyst, y SRAD (Hofierka & Suri, 2002), facilitando su aplicación en grandes áreas. El modelo R.Sun se alimenta del modelo del terreno en formato ráster, latitud, turbiedad, radiación, e índice de cielo despejado, con el fin de generar mapas ráster de radiación, y sombras para superficies planas e inclinadas. Este modelo es ajustable a condiciones de cielo despejado o nublado, a partir de transmisión difusa y funciones de altitud. La radiación reflejada por el suelo se considera isotrópica y se calcula a través de la definición de la fracción de suelo visible. El modelo puede entregar resultados para un momento particular o un período de tiempo, y está optimizado para las condiciones climáticas Europeas. La mayor

contribución conseguida, es la base de datos en línea denominada PVGIS (Šúri, Huld, & Dunlop, 2005), en la cual se puede simular el desempeño de los componentes eléctricos fotovoltaicos una vez se obtiene la radiación solar con el modelo r.sun.

- RayMan: modelo desarrollado para el análisis del confort térmico humano, escrito en código Delphi para Windows. Analiza el confort térmico humano, a partir de la simulación de los flujos de densidades de radiación de onda corta y larga en entornos tridimensionales. Estudia las horas de sol y sombra, y grafica los efectos de la atenuación atmosférica sobre la radiación directa, así como la relación entre la isotropía y anisotropía con la radiación difusa. Como información de partida para el modelamiento, emplea datos meteorológicos, como la temperatura y humedad del aire, velocidad del viento, albedo, y emisividad de las superficies sólidas (Matzarakis, Rutz, & Mayer, 2010).
- Ventana del cielo preferente: en inglés “preferable sky window”, y trata de una técnica empleada para evaluar la disponibilidad de luz día en diferentes escenarios urbanos, a través de la identificación de las secciones del cielo para las cuales existen los mayores potenciales de luz día en un plano horizontal localizado dentro de una edificación. Aborda el hemisferio como un conjunto de parches, el ángulo incidente de la luz, y la visibilidad del cielo en espacios cerrados, todo esto con el fin de calcular la proyección equidistante como un SVF (Pereira, Leder, Moraes, & Lenzi, 2009).
- Tooke et. al: es un método fundamentado en el análisis de probabilidad de vacíos, con el fin de calcular la fracción de la radiación entrante que se transmite a través de la cobertura de vegetación urbana. Con esto va un poco más allá de la simple proyección de elementos sólidos. Para este método es importante considerar que la vegetación adquiere atributos que la hacen semitransparente desde el modelamiento de la radiación en espacios urbanos (Tooke, Coops, Christen, Gurtuna, & Prèvot, 2012). A partir de múltiples retornos de la señal LiDAR deduce niveles de penetración de la cobertura, un coeficiente de extinción de la vegetación, y una función de probabilidad de la densidad para cada árbol. Considera un cielo isotrópico, pero excluye el componente reflejado.

El método en general es recomendado para la evaluación del estado de la vegetación en cierto momento dado, gracias a la escala temporal, espectral y estructural de la captura de datos LiDAR.

- Solar3DBR: aborda la proyección de sombras generadas por edificaciones y otros objetos sobre superficies fotovoltaicas, donde luego son comparadas con casos experimentales reales (Melo, Almeida, Zilles, & Grimori, 2013). La metodología de trabajo contempla el cálculo de un factor de sombra, así como la radiación sobre superficies tridimensionales, simplificando el modelo de (Perez et al., 1990). Para conseguir lo anterior, define una matriz de sombras que contiene los factores de sombra directa, el efecto de las sombras sobre el haz de luz directo, isotrópico, circunsolar, y los componentes de la radiación solar difusa en el horizonte. Lo anterior simplifica el modelo e incrementa la precisión, y reduce el tiempo computacional requerido para su procesamiento. Este software fue desarrollado como un plug-in para SketchUp.
- SORAM: algoritmo que evalúa la radiación solar difusa incidente y la radiación directa sobre una celda fotovoltaica inclinada en un entorno urbano (Erdély, Wang, Guo, Hanna, & Colantuono, 2014); calcula la dinámica tridimensional de la proyección de la sombra desde los obstáculos urbanos como edificaciones o árboles. No considera la radiación reflejada. Resultados alcanzados con este método han demostrado mejores resultados en comparación a los del modelo de Perez.

Comparación de modelos previos: Escenario de comparación de cuatro modelos, SolarAnalyst, R.Sun, SRAD, y Solei-32, basados en la elevación del terreno de cierta zona del Mediterráneo, con condiciones topográficas complejas. Se consideró que el cielo estaba despejado y nublado, a resoluciones espaciales de 20 m y 100 m. De acuerdo a los resultados obtenidos por cada modelo, se compararon con los datos registrados en tierra por estaciones meteorológicas. Los resultados mostraron mejores resultados con R.Sun y Solei-32, con un error medio cuadrático (i.e. RSME) alrededor del 15% y bias media del error (i.e. MBE) inferior al 10%. La confiabilidad se incrementa con la resolución espacial del modelo en condiciones de cielo despejado, pero decrece en condiciones de nubosidad. Esto último se



explica dado que en condiciones nubladas casi toda la radiación solar es difusa, la cual es menos influenciada por los efectos de la topografía circundante, en contraste con la radiación directa, de esta manera resulta de difícil estimación (Freitas et al., 2014).

A su vez se encontró la posibilidad de emplear los datos calculados para ajustarlos de acuerdo a la información real recopilada en campo. Es así como SolarAnalyst y SRAD emplean observaciones reales para delimitar el estado de la atmósfera previo al cálculo de los mismos; por otro lado, los modelos R.Sun y Solei-32 corrige las estimaciones a partir de los datos registrados en la realidad. Esta última estrategia consiguió estimaciones más consistentes (Freitas et al., 2014).

#### 4.2 Modelos para la obtención del potencial solar en centro urbanos

Conforme a la morfología tridimensional de los sectores urbanos, es necesario adaptar los modelos de radiación solar en función de las propiedades físicas de los planos y áreas de interés. Esto vislumbra una cantidad considerable de posibles opciones a las cuales se deben enfrentar los algoritmos de cálculo, siendo las superficies verticales las de mayor complejidad (Freitas et al., 2014), en donde se debe almacenar la información respectiva para cada celda.

Por lo general, los modelos extruyen las edificaciones en altura a partir de un elemento, lo que genera una superficie vertical representada por un único valor. De esta manera se crea un modelo denominado 2.5D, donde para cada posición planimétrica ( $X$ ,  $Y$ ) existe una altura ( $Z$ ) (Jochem, Hofle, Rutzinger, & Pfeifer, 2009).

A su vez, una nube de puntos 3D generada con un escáner láser se pueden convertir en celdas ráster 2.5D, lo que genera una pérdida irreversible de la tercera dimensión. Esto es válido cuando no se requiera la tercera dimensión, optimizando tiempos de procesado.

No obstante, cuando se requiere evaluar el potencial solar de fachadas siguiendo el método anterior no es posible calcular la radiación solar para los puntos que conforman la fachada, debido a la vinculación de una discontinuidad en el modelo 2.5D (Redweik, Catita, & Brito, 2011). La tercera dimensión puede incluirse si existe un modelamiento adecuado de la fachada, lo cual requiere de bastante tiempo de procesado, considerando la escala del espacio

objeto de estudio. De esta manera esta técnica para abordar el detalle de la radiación sobre puntos específicos por lo general se hace para modelamientos individuales de las edificaciones, incluyendo elementos arquitectónicos detallados.

Por otro lado, existe otro enfoque basado en la tecnología de escáner láser móvil (i.e. MLS) para estimar el potencial solar de las fachadas en las edificaciones a partir del algoritmo R.Sun (Hofierka & Suri, 2002). Para este caso, se obtienen las sombras a partir de un radio de búsqueda de objetos cercanos para luego proyectar el horizonte sobre cada punto 3D perteneciente a la fachada, consolidando de esta manera una nube de puntos 3D GIS. Por las limitaciones de la tecnología del MLS, es necesario ajustar los datos para aquellas zonas que permanecen ocultas al escaneo del vehículo, por las condiciones mismas del espacio disponible en entornos de trabajo variados.

Adicionalmente es necesario mencionar que cualquier modelo tridimensional puede representarse en diferentes niveles de detalle (i.e. LOD), en una escala numérica del 0 al 4, según los intereses particulares del estudio (Nouvel, Schulte, Eicker, Pietruschka, & Coors, 2013). El LOD = 0 representa únicamente el terreno, LOD = 1 muestra las principales características de las edificaciones representadas en paralelepípedos, LOD = 2 reúne información de la pendiente de los tejados, LOD = 3 representa elementos de las fachadas, y el LOD = 4 agrupa características internas de las edificaciones.

En síntesis, los modelos para la obtención del potencial solar en centro urbanos se clasifican en (1) modelos todos en uno, (2) modelos basados en plug-in para CAD, y (3) modelos basados en Sistemas de Información Geográfica (Freitas et al., 2014), las cuales serán tratadas con mayor detalle posteriormente.

#### 4.2.1 Modelos todos en uno

Herramientas que agrupan módulos para calcular la radiación solar con interfaz de diseño y representación 3D de los objetos dentro del mismo programa. Genera resultados confiables a pequeña y mediana escala, en un entorno amigable de

operación. Dentro de los principales modelos de este tipo se encuentran los siguientes.

Townscope: evolución del modelo CAM.UR, el cual era un sistema para el manejo asistido por computador de la renovación urbana, desarrollado en los años 80's por el grupo de investigación LEMA, perteneciente a la Universidad de Leige, Bélgica (Teller & Azar, 2001). Esta herramienta brinda soporte en la toma de decisiones desde el punto de vista del diseño urbano sostenible, y está conformado por un sistema de información urbana 3D, que permite la evaluación solar, morfológica, y análisis de riesgos por la ocurrencia de vientos.

Para abordar los cálculo, los volúmenes son representados como puntos 3D, polilíneas, bordes, superficies y volumen, para lo cual genera una triangulación que define el suelo y las superficies de forma irregular. Los modelos 3D pueden importarse a partir de formatos CAD. Dentro de los productos generados, se encuentra la radiación solar directa, difusa y total sobre cualquier superficie o punto definido por el usuario. Permite evaluar las máscaras de las sombras y la duración de la luz día en cierto período de tiempo. Facilita la evaluación de los parámetros de calidad de espacios abiertos urbanos como confort térmico, apertura del cielo, y la visibilidad (Azar, 2013).

El análisis solar lo realiza de acuerdo a la obtención de radiación horaria en un sitio despejado, de acuerdo a la latitud, altitud, humedad, turbiedad e información meteorológica (Azar, 2013). Herramienta de software comercial.

Solene: simula la luz natural en los edificios a partir de modelos numéricos, de acuerdo a la geometría de la edificación, estado del clima, diferenciando entre espacios abiertos y cerrados. Desarrollado por CERMA, por el Laboratorio de Investigación de la Escuela de Arquitectura de Nantes, Francia (Miguet & Groleau, 2001). Escrito en lenguaje C++, para funcionar con OpenGL como una visualización de librerías. Modela el sol a partir de un enfoque geométrico, y la energía se calcula de acuerdo a un modelo estadístico de radiancia a partir de variables como la constante solar, altitud,

excentricidad, masa de aire, y turbiedad, de acuerdo con el modelo de Perez.

Este software resulta apropiado para calcular la radiación a pequeña escala (Freitas et al., 2014), siendo edificios y calles su principal objeto, permitiendo procesar transparencias y los efectos de las propiedades de materiales de las edificaciones sobre las reflexiones.

#### 4.2.2 Modelos basados en Plug-in para CAD

Diferenciándose de los anteriores, los plugins pueden integrarse directamente a herramientas CAD para llevar a cabo estudios de radiación, haciéndolos versátiles en diferentes aplicaciones, y a su vez permitir alcanzar detalles destacables, en un entorno amigable para el usuario. A continuación se mencionan los principales.

Skelion: plugin comercial creado para el software Sketchup, permite simular la cantidad de energía eléctrica obtenida a partir de un sistema fotovoltaico, así como la proyección de obstrucciones solares sobre el tejado a partir de su altura y distancia, o el criterio de sombra solsticio, todo esto con el fin de determinar el cumplimiento de los requerimientos energéticos.

Skelion al funcionar sobre SketchUp, acoge todas sus ventajas en cuanto a la simplificación en el manejo y procesamiento de datos estructurales de las edificaciones. Estima la radiación solar y la producción eléctrica fotovoltaica a partir de la información disponible en PVGIS o PVWatts. Cuando basa sus análisis en PVWatts, el plugin puede calcular la variación de la potencia de la sombra y el porcentaje de energía solar disponible para cada panel fotovoltaico. En general es una herramienta ágil y práctica en la consecución de resultados (Freitas et al., 2014), sin embargo pierde la tercera dimensión de los datos por cuanto no puede proveer valores en altura para las fachadas, limitando consecuentemente el análisis de sombras sobre las mismas.

Autodesk Ecotect Analysis: es propiamente un programa que funciona en un entorno CAD, mezclando funciones de análisis detallado con una interfaz amigable, facilitando el despliegue de resultados en una visualización tridimensional. Desarrollado por Square One Research inicialmente, y luego adquirido por Autodesk en 2008 para ser comercializado. Ecotect sigue un modelo que calcula la radiación total, directa y difusa sobre las edificaciones incluyendo techos y fachadas, ya sea para una hora y día específico, o un período de tiempo, a partir de un fichero del clima que alimenta los principales datos de radiación, temperatura, horas diarias de luz solar, longitud y latitud del sitio de interés. Permite trazar la posición del sol a lo largo del día o del año en relación al modelo de interés. Permite incluso simular como la luz día ingresa por las ventanas de las edificaciones y se desplaza durante el día (Autodesk, 2010).

#### 4.2.3 Modelos basados en Sistemas de Información Geográfica

Reúnen una serie de modelos de gran complejidad en la predicción del potencial físico del recurso solar a grandes escalas en zonas con características urbanas (Freitas et al., 2014). A continuación se describen los principales.

- Carneiro et. al: emplea datos LiDAR, mapas digitales vectoriales 2D de las huellas de las edificaciones e información altimétrica de las edificaciones para desarrollar un modelo de superficie urbana 2.5D (Carneiro, Morello, Desthieux, & Golay, 2010). Considera a todas aquellas superficies con pendientes mayores a  $60^\circ$  como superficies verticales. La radiación solar sobre tejados y fachados es llevado a cabo el modelo anisótropo de Hay (Hay, 1979). Recurre al software Matlab para calcular la radiación horaria directa y difusa sobre cualquier superficie en condiciones de cielo despejado. Incluye la reflexión existente de objetos cercanos, así como un algoritmo de SVF (Ratti & Richens, 2004) y sombras.

Debido a que las fachadas cuentan con puntos que tienen la misma posición X, Y pero diferentes alturas Z, el modelo hace uso de un modelo 3D segmentado por alturas, en partes de espesor igual a 3 m, para de esta manera conseguir modelar el comportamiento aproximado por cada nivel de la edificación. De esta manera cada parte cuenta con un atributo asociado a la radiación calculada (Freitas et al., 2014). Emplea datos de Meteonorm, la cual es una plataforma de datos de irradiación solar media para cada mes de un año típico por píxel. Permite realizar consultas sobre la fachada o el tejado.

- V.Sun: módulo de procesamiento de datos tipo vector que puede ejecutarse sobre el programa de libre acceso denominado GRASS GIS. Parte de la metodología existente para estudiar la radiación solar del modelo r.sun (Hofierka & Suri, 2002), y la cual solo era compatible con datos ráster. Este nuevo módulo (Hofierka & Zlocha, 2012) tiene un enfoque para trabajar con modelo tridimensionales de ciudades en formato vector, los cuales pueden tener niveles altos de detalle (Abdul-Rahman & Pilouk, 2008).

Los efectos de las sombras provenientes de objetos aledaños son considerados por medio de un algoritmo de proyección de sombras, a partir de los efectos generados por construcciones cercanas. Requiere de la segmentación de superficies en pequeñas partes (voxels), para conseguir definir la variación espacial de la radiación solar, en aquellas zonas donde existan sombras parciales. Los voxels de menor tamaño incrementan la precisión, así como el tiempo de procesamiento computacional.

Calcula tres componentes de la radiación solar en cielo despejado, como lo son el haz de luz, la radiación difusa, y la radiación reflejada, considerando la atenuación de la radiación extraterrestre por los efectos de masas de aire y la turbiedad de la atmósfera. La

radiación real del cielo se aproxima a partir de estos componentes, empleando un índice de cielo despejado, el cual representa la atenuación de la radiación por condiciones de nubosidad.

- Jakubiec y Reinhart: centra su atención en la creación de un modelo 3D a través de un motor de simulación para rastrear los rayos de la luz día (Daysim). La representación 3D del casco urbano se genera a partir de datos LiDAR remuestreados sobre una rejilla plana (Jakubiec & Reinhart, 2013), para luego separar las edificaciones del terreno empleando los conjuntos de datos GIS de la zona. Esta división categoriza los puntos para luego ser triangulados con el algoritmo de Delaunay y georreferenciarse al sistema de coordenadas correspondiente, necesario al momento de calcular la radiación. Las superficies de tejados con pendientes mayores a  $60^\circ$  se consideraron como fachadas.

La simulación de la radiación empleando Daysim para cierto tiempo, se basa en el modelo de Perez (Perez, Seals, & Michalsky, 1993) y el método de cielo acumulado para una rejilla de 1,5 m<sup>2</sup>. Emplea valores horarios medios de la radiación global horizontal y temperatura del aire de estaciones meteorológicas cercanas. El modelo demostró su precisión a partir de la comparación con datos obtenidos de sistemas fotovoltaicos existentes en cierta zona bajo estudio (Jakubiec & Reinhart, 2013).

- SOL: algoritmo creado para funcionar con Matlab en la evaluación del potencial solar en entornos urbanos, para cualquier punto del paisaje que lo conforma, sin importar su localización (Catita, Redweik, Pereira, & Brito, 2014). El método requiere de una nube de puntos LiDAR remuestreada en una capa ráster de 1 m<sup>2</sup> de resolución, asumiendo que aquellos píxeles con pendientes superiores a  $72^\circ$  se reclasifican como de  $90^\circ$ , siendo considerados como parte de fachadas. Los datos meteorológicos parten de un año típico local (TMY) de la base de datos comercial

- SOLTERM, la cual incluye valores horarios medios calculados de radiación directa y difusa a partir de observaciones climáticas compiladas por un período de 30 años. Asocia la geometría de las superficies con la posición del sol para obtener la radiación.

Un algoritmo acoge cada punto del modelo digital de superficie como un proyector de sombras a lo largo de línea opuesta a la dirección del sol para el instante en estudio (Redweik et al., 2011); en dado caso que la línea sea interrumpida, se establece que el píxel se encuentra en una sombra y acoge un valor de cero como atributo, para configurar de manera general un mapa binario.

Por otro lado el algoritmo SOL aplica el método del factor del cielo visible (i.e. SVF) en donde se considera una distribución irregular de las fuentes de luz que generan la radiación difusa circunsolar (Ratti & Richens, 2004). Los puntos que hacen parte de las fachadas son clasificados como hiperpuntos, los cuales comparten la misma coordenada X, Y, pero diferente altura Z. Es por esto que el factor SVF debe dar un manejo especial para cada punto bajo condiciones de sombra o iluminación (Freitas et al., 2014).

#### 4.2.4 Modelos basados en Web

Estos modelos surgen como una forma de solucionar problemas particulares de ciertas zonas a partir de su disponibilidad en una plataforma online, a partir de los cálculos llevados a cabo por los modelos matemáticos expuestos en apartados previos. Un ejemplo podría ser la vinculación de datos de radiación solar a un mapa catastral, con el fin de realizar análisis posteriores del potencial eléctrico de cierta zona, en un entorno sencillo que permita formular consultas sin mayor complejidad para el usuario final. Los principales mapas solares públicamente disponibles son PVGIS, PVWATTS y Mapdwell.



- PVGIS: es una base de datos georreferenciada que permite la visualización de la radiación solar para Europa, África, y Sudoeste Asiático con una resolución espacial de 1 km. Permite calcular la radiación solar para una coordenada geográfica, basándose en el modelo R.sun y datos medidos en campo, siendo opcional el establecer coeficientes de cielo despejado. Este modelo descuenta internamente las pérdidas de radiación debido a la proyección de sombras sobre el terreno. Por otro lado, permite personalizar parámetros de diseño de sistemas fotovoltaicos con el fin de evaluar su conveniencia.

Dentro de los resultados desplegados por este sistema, se encuentran mapas de irradiación global mensual o anual, perfiles de irradiancia diarios, y el potencial de producción fotovoltaica de acuerdo a la temperatura ambiente (Freitas et al., 2014). Facilita al usuario la posibilidad de escoger diversas fuentes de información meteorológica, incluso a partir de satélites como el CM-SAF (Meteosat). Las zonas montañosas aún presentan un grado de incertidumbre, no obstante la base de datos más reciente tiene una desviación de bias del +2% (Huld, Muller, & Gambardella, 2012).

- PVWATTS: herramienta inicialmente disponible únicamente para los Estados Unidos (Marion, Anderberg, & George, 2001). Acoge datos de un año típico meteorológico TMY2, junto a un modelo topográfico de resolución espacial 40 Km<sup>2</sup>, los cuales en la herramienta PVFORM, y aplicando el modelo de Perez, permite estimar la producción fotovoltaica anual. Desarrollado por el Laboratorio Nacional del Departamento de Energía de los Estados Unidos (NREL), y se enfoca principalmente en la evaluación los rendimientos económicos obtenidos eventualmente al comercializar energía generada a partir de sistemas PV, así como la estimación del desempeño de instalaciones fotovoltaicas en diferentes lugares alrededor del mundo.

- Mapdwell: plataforma online basada en el modelo de Jakubiec y Reinhart, creada por tecnología desarrollada en el MIT, que evalúa el potencial de generación de energía eléctrica a partir de la eventual instalación de sistemas fotovoltaicos en algunas comunidades de Estados Unidos y Chile.

A partir de la delimitación del tejado objeto de interés, la plataforma calcula el potencial solar de forma cuantitativa, con una escala de poco a alto potencial, los ahorros obtenidos en caso de existir una instalación PV, costos asociados de la inversión e ingresos en aquellos casos que las administraciones locales estimulen este tipo de iniciativas. Permite al usuario modificar la extensión de la zona potencial en donde se instalará el PV y el modelo recalcula en tiempo real las variables mencionadas previamente.

De igual manera relaciona los beneficios ambientales de la implementación de la tecnología (e.g. número de árboles capturando el CO<sub>2</sub>, y los ahorros en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes a las emisiones anuales por el sistema de energía tradicional). Permite generar un reporte en PDF del potencial eléctrico solar que agrupa la información en las categorías localización, costos/ingresos, retorno, potencia, carbono, tamaño del sistema, y beneficios ambientales (Mapdwell, 2015).

## 5. DESARROLLO METODOLÓGICO

A partir de la cartografía oficial disponible en el portal de la Sede Electrónica de la Dirección General de Catastro (DGC, 2015), y con el fin de llevar a cabo el estudio de caso, fueron seleccionadas cuatro zonas urbanas de la ciudad de Ávila, España, con diferencias morfológicas cuyas características se describen a continuación y se ilustran en la Figura 2. La información cartográfica tiene como sistema proyectado de coordenadas ETRS 1989 UTM Zona 30N, en formato shapefile.

- Zona 1: sector residencial de tipología propiedad horizontal densificado, localizado al Sur de la Muralla, entre las vías: Calle Burgohondo, Calle Nuestra Sra. de Sonsoles, Calle Rafaela de Antonio, y la Calle Valle del Tiétar. Área construida: 28,380 m<sup>2</sup>, con una altura media de las edificaciones alrededor de 8 m.
- Zona 2: sector dotacional de servicios educativos, donde funciona la IES José Luis Aranguren, junto a un edificio residencial en propiedad horizontal. Localizado al Sur de Ávila, entre las vías: Av. Juan Pablo II, Calle de Santo Tomás, Travesía de Santi Spíritu, y la Calle de las Cinco Villas. Área construida: 24,220 m<sup>2</sup>, y una altura media de las edificaciones alrededor de 10 m.
- Zona 3: sector residencial disperso, con presencia de viviendas distribuidas a lo largo de predios, localizado al Noreste de Ávila, entre las vías: Calle Pintor Caprotti, Calle Málaga, Ctra. El Espinar (SG-500), y Calle Pedro García Burguillo. Área construida: 12,140 m<sup>2</sup>, con una altura media de las edificaciones aproximada a 7 m.
- Zona 4: sector industrial y comercial, localizado al Noreste de Ávila, comprendido entre las vías: Calle Río Órbigo, Calle Río Tera, Calle Cristo de las Murallas, Calle Río Mayor, y la línea del Ferrocarril. Área construida: 88,630 m<sup>2</sup>, siendo la altura promedio de las edificaciones alrededor de 4 m.

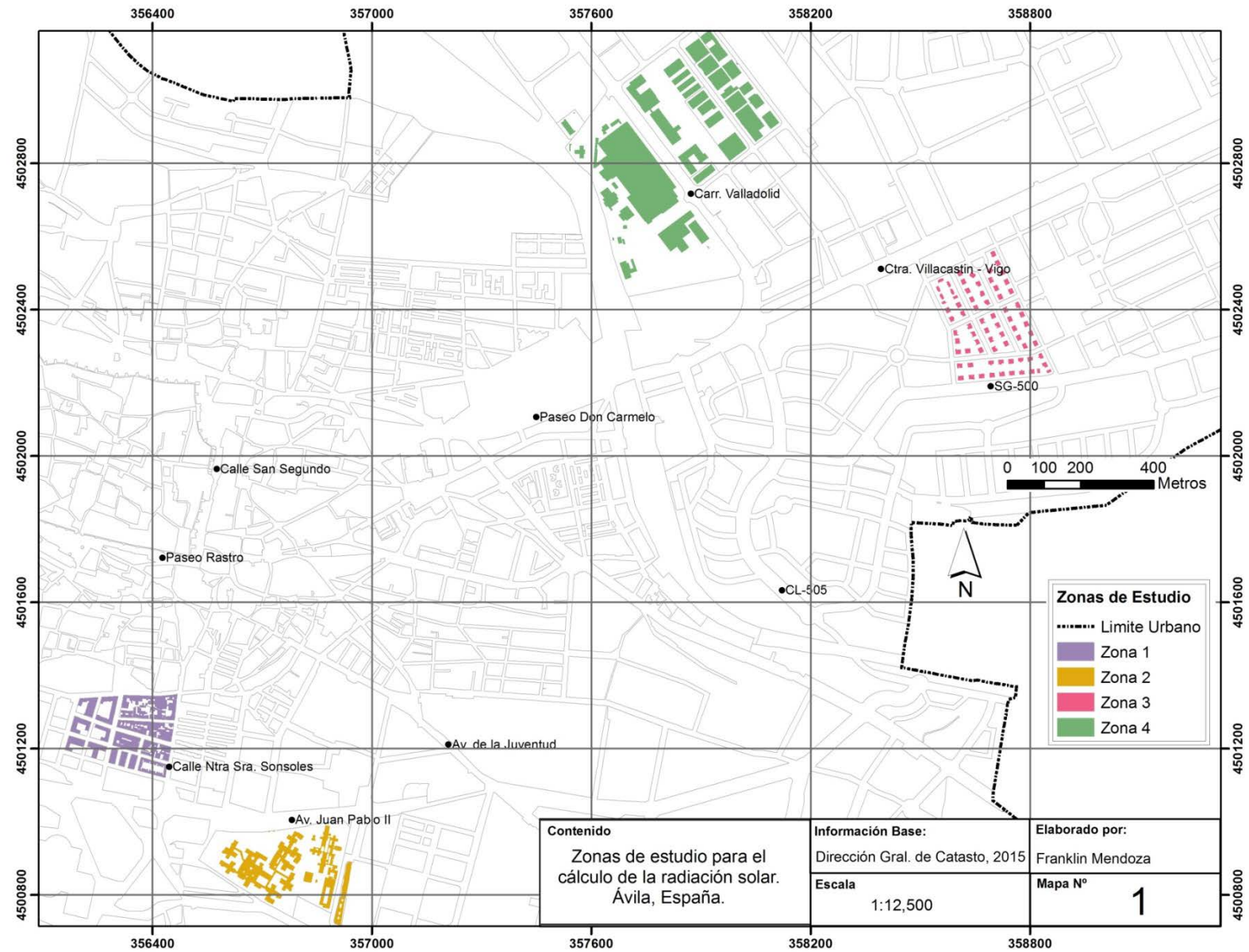


Figura 2 - Zonas de estudio para el cálculo de la radiación solar

El objeto de definir cuatro zonas de estudio, no es otro que ilustrar el proceso de obtención de datos, con el fin de identificar zonas con mayor potencial de aprovechamiento de la radiación solar en Ávila, teniendo en cuenta el uso y ocupación del suelo. La extensión de cada una de estas no es la misma, por cuanto la geometría de cada fachada, así como los tejados exigen un costo operacional que debe considerarse al momento de estimar la radiación sobre los modelos tridimensionales de las edificaciones; De esta manera se escogieron zonas urbanizadas que ocupan por lo menos 10 Ha, de tal forma que su procesamiento completo no tardase más de un día. Entiéndase por procesamiento completo, el procedimiento comprendido desde la generación del modelo tridimensional de las edificaciones, hasta el cálculo de la radiación solar total, directa y difusa.

A partir de la cartografía que agrupa las zonas de estudio, y con la ayuda de ArcGIS 10.2.2 se extrajeron los polígonos que representan las huellas de las edificaciones (i.e. en inglés Building footprints), que resultan ser fundamentales para generar el modelo tridimensional. La información base catastral cuenta con un atributo denominado "Constru", el cual registra el número de niveles a nivel y debajo del suelo por cada predio edificado. No obstante, para este estudio, únicamente se consideraron aquellos niveles existentes por encima del suelo, por cuanto definen la geometría objeto de evaluación de la radiación solar incidente. Para cada uno de estos niveles, se consideró una altura promedio de tres metros, de tal forma que se obtuvo una altura promedio por cada zona construida, la cual se almacenó en un nuevo campo de atributos de tipo entero, denominado "height".

Luego de obtener los shapefiles de las huellas de las edificaciones con las respectivas alturas, son importados desde el software CityEngine 2014, propiedad de ESRI. Esta herramienta se especializa en la creación de espacios urbanos tridimensionales para diversos usos en la gestión del territorio, así como en la industria de los videojuegos. A partir de la asistencia online de CityEngine (ESRI, 2012), se procedió a extruir cada polígono de las huellas de las edificaciones de acuerdo a la altura definida en los atributos, obteniendo de esta manera las fachadas. Luego a partir de las fachadas, se generan los tejados de las edificaciones. Los tipos de tejados generados fueron aleatorios, representando una distribución mixta, siendo los tipos más comunes aquellos que se relacionan a continuación (Figura 3). El entorno de trabajo de CityEngine se ilustra en la Figura 4.

- Tipo 1: tejado a cuatro aguas con una inclinación de 18°.
- Tipo 2: tejado a cuatro aguas con una inclinación de 25°.
- Tipo 3: tejado a cuatro aguas con una inclinación de 25°, y una proyección del área cubierta hacia el exterior, que supera la intersección con la fachada.
- Tipo 4: tejado a dos aguas con una inclinación de 18°.

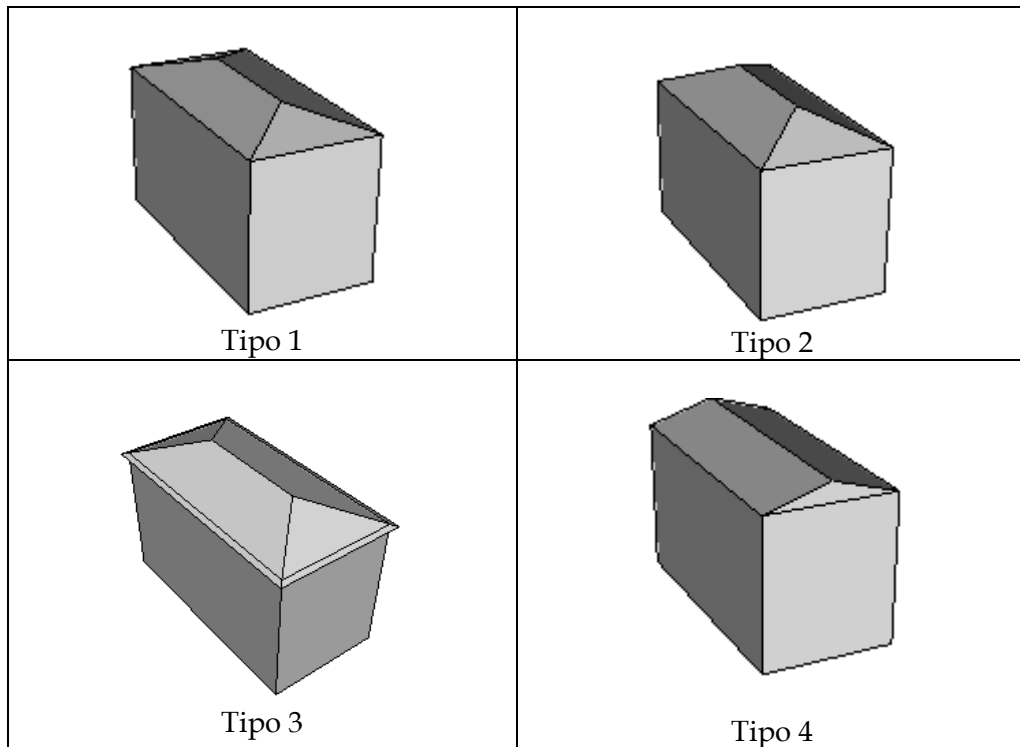


Figura 3 - Tipos de tejados representados

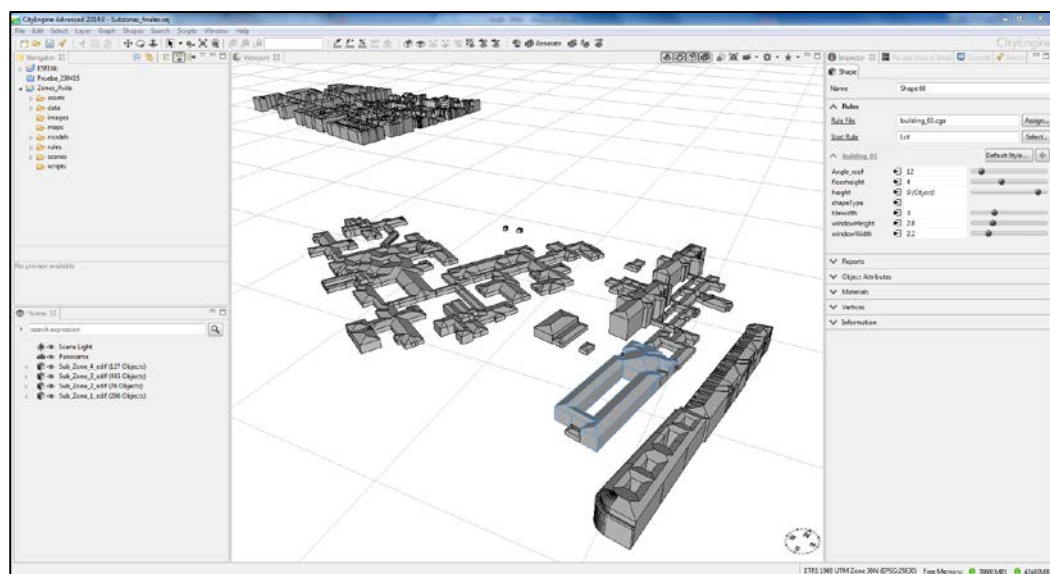


Figura 4 - Entorno de CityEngine 2014

Una vez fueron definidos los tipos de tejados para las edificaciones, se procedió a generar los modelos tridimensionales para cada una de las zonas de estudio, los cuales se ilustran en las Figura 5 - Figura 8.

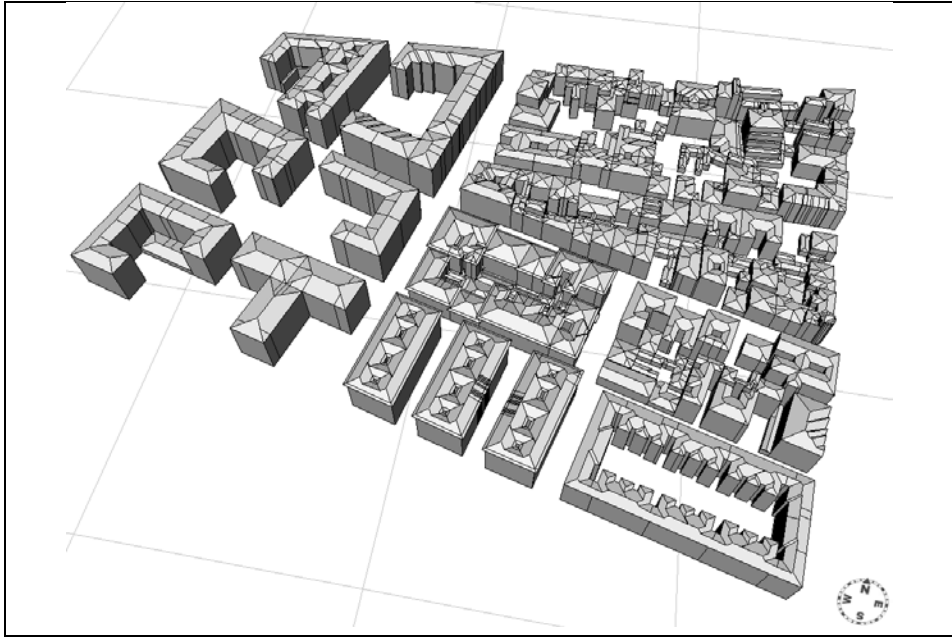


Figura 5 - Representación 3D de la Zona 1

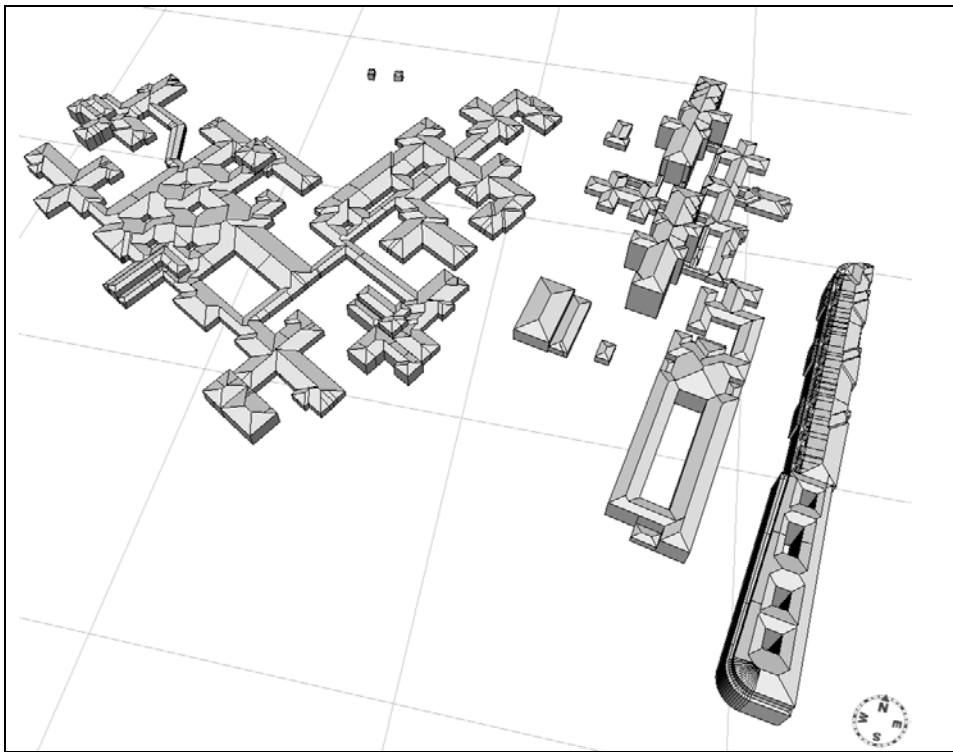


Figura 6 - Representación 3D de la Zona 2

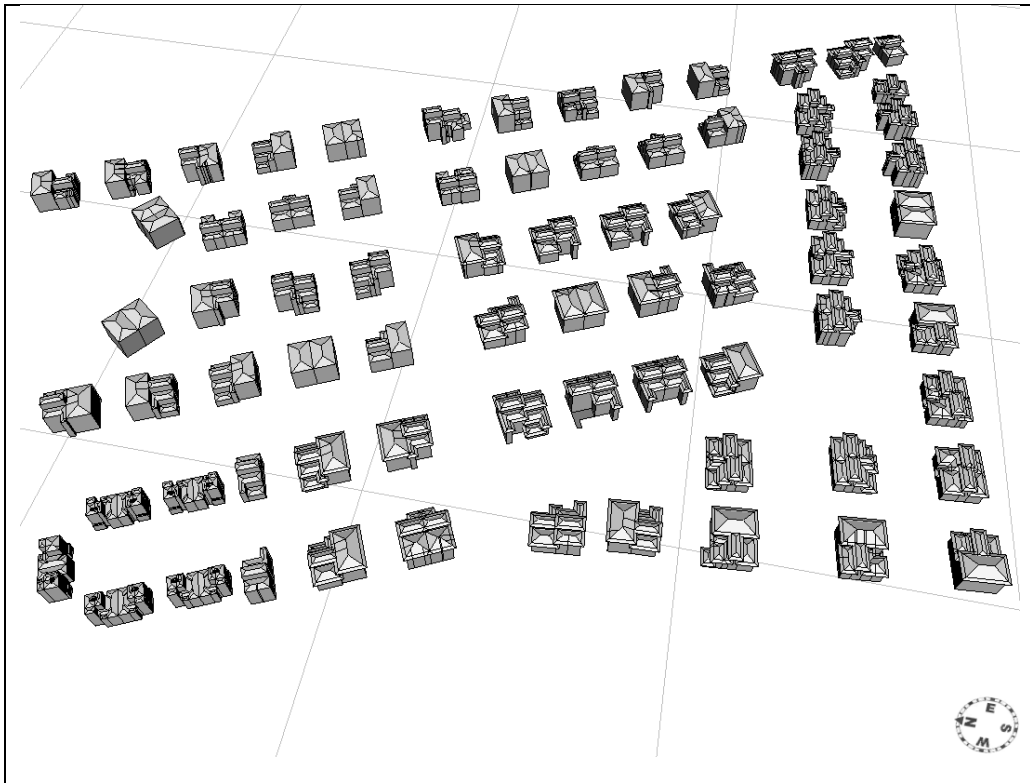


Figura 7 - Representación 3D de la Zona 3

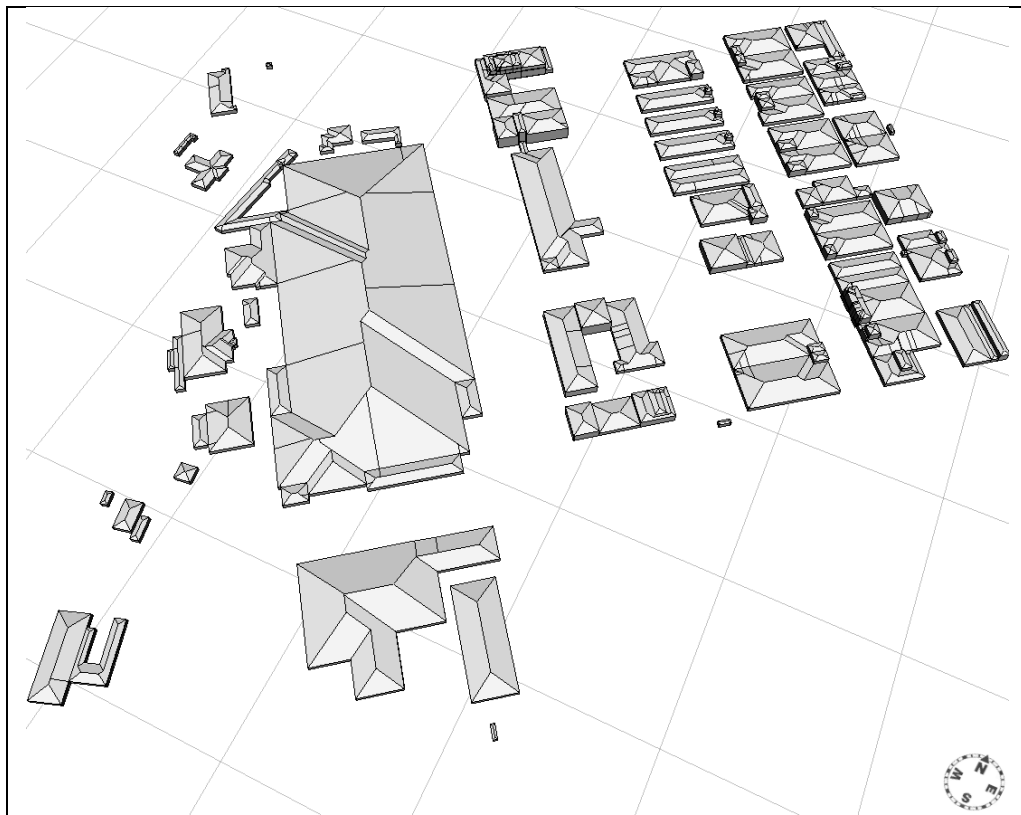


Figura 8 - Representación 3D de la Zona 4



El modelo tridimensional obtenido para cada una de las zonas de estudio en el apartado anterior, se consiguió a partir de la información original obtenida de las huellas de las edificaciones suministradas por el portal de Catastro. Esto implica que la precisión en número de puntos por cada edificación es lo suficientemente alta para conseguir representar de una manera exacta la distribución espacial de las fachadas para cada una de las edificaciones.

El algoritmo de reconstrucción tridimensional de fachadas y tejados empleado por CityEngine, parte de los polígonos definidos por una serie de puntos que conforman las huellas de las edificaciones (i.e. footprints), el cual proyecta verticalmente su distribución espacial, de acuerdo al atributo que define la altura de cada predio (i.e. height). Con esto, el gran número de puntos que conforma cada predio reproduce una serie de detalles que sobrecargan el modelo de los tejados y fachadas, lo que no siempre es lo más adecuado para su posterior empleo en el cálculo de la radiación solar.

Para este caso de estudio, adicional a lo mencionado previamente, se decidió escoger la Zona 1 como una particularidad de análisis, por cuanto su compleja geometría obtenida con el modelo 3D requiere una revisión adicional, principalmente en los tejados representados, los cuales presentan algunas variaciones distantes de la realidad. Para esto, con la ayuda de ArcMap y partiendo del shapefile de las huellas de las edificaciones, se procede a la generalización de los puntos que conforman los límites de las construcciones, con la herramienta cartográfica denominada "simplify building". De esta manera, se le definió al modelo una tolerancia de 1 cm para que reduzca el número de puntos, sin afectar de forma considerable la integridad del mismo. La Figura 9 ilustra el resultado obtenido con la generalización de los puntos.



Figura 9 - Resultado de la simplificación de las huellas de las edificaciones

Por otro lado, como se mencionó previamente el objetivo principal de estudio es ilustrar una manera de calcular la radiación solar para modelos tridimensionales de edificaciones urbanas. Sin embargo en los casos iniciales de las Zonas 1, 2, 3 y 4 se consideraron los tejados de una manera aleatoria, de tal manera que su representación no necesariamente es la que existe actualmente sobre cada una de las edificaciones.

Aprovechando la diversidad geométrica de la Zona 1, se emplearon las aerofotografías disponibles del PNOA (IGN, 2015), vinculadas al modelo con la ayuda del gestor de servicios WMS de ArcMap, con el fin de establecer el tipo de tejado por cada edificación. Consecuentemente el modelo tridimensional a obtener para esta zona (Zona 1A) reunirá atributos cercanos a la realidad, permitiendo así su posterior contraste con el modelo original de la Zona 1 (Figura 10). El modelo tridimensional obtenido con CityEngine de la Zona 1A, se ilustra en la Figura 11.

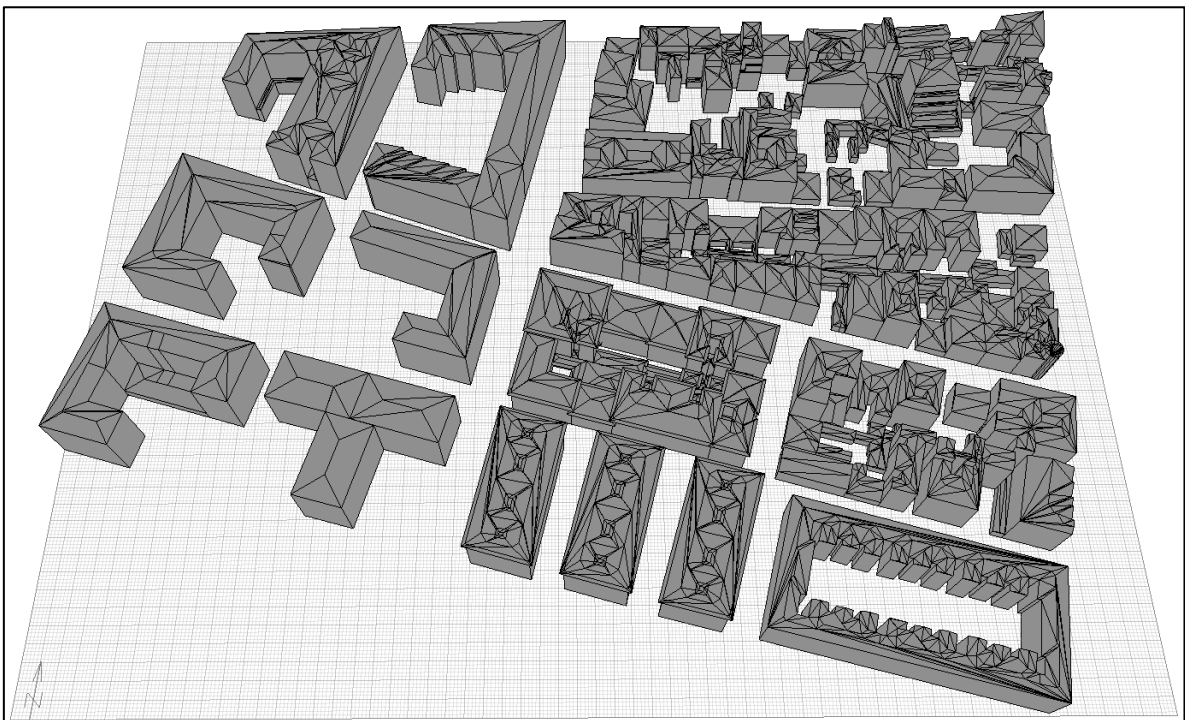


Figura 10 - Representación 3D de la Zona 1 (Datos originales)

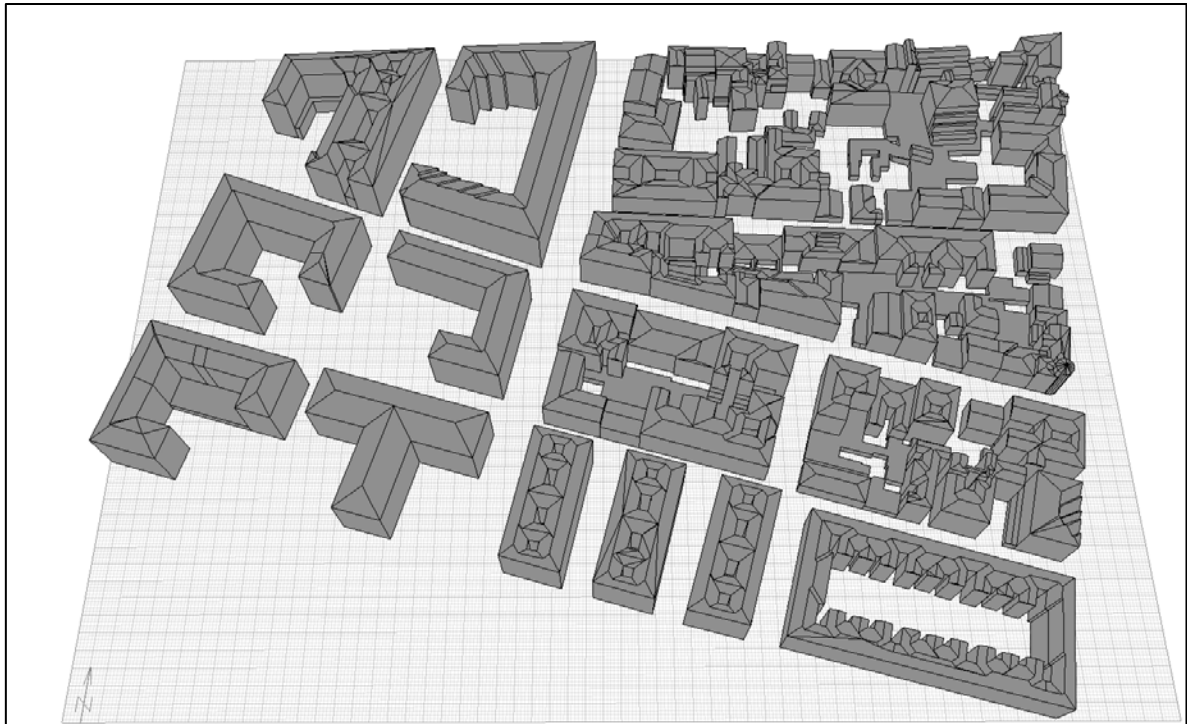


Figura 11 - Representación 3D de la Zona 1A (Datos generalizados)

De acuerdo a la revisión bibliográfica de los diferentes modelos y software disponible para la evaluación de la radiación solar sobre fachadas y tejados, se escogió el software denominado Autodesk Ecotect Analysis 2011 cuya interfaz es versátil y sencilla, permitiendo definir el grado de detalle requerido al momento de realizar los cálculos de radiación, así como recrear en tiempo real la trayectoria del sol, y la proyección de sombras en la escena tridimensional de estudio.

Es importante recomendar que el modelo 3D de la zona de estudio generado por CityEngine se debe exportar al formato .FBX de Autodesk, el cual a su vez se convierte al formato .OBJ con la ayuda del gestor libre de formatos, denominado Autodesk FBX Converter. Esto asegurará la idoneidad del modelo entre transiciones de formatos, evitando pérdidas de datos.

Ecotect emplea los datos de la radiación solar obtenidos de un fichero del clima (i.e. weather file), en combinación con lo que él denomina máscaras de sombras. Estas últimas evalúan la cantidad de ensombrecimiento que recibe una superficie de un objeto en un rango de ángulos del cielo. Por supuesto si se analizara un solo punto, la sombra está presente o no, sin embargo para una superficie mayor pueden darse situaciones en donde se encuentre parcialmente bajo sombra, de allí que requiera de una matriz de valores compleja para diferentes ángulos.

En la Figura 12 se ilustra una máscara de ensombrecimiento para un polígono que hace parte de una fachada.

Una vez se realiza este cálculo (toma bastante tiempo en función de las superficies a evaluar), Ecotect multiplica el porcentaje de ensombrecimiento de la superficie por la cantidad de radiación solar que habría recibido de no existir sombras. Ecotect realiza este cálculo tanto para la radiación directa (desde el sol) y difusa (desde el domo del cielo). La máscara se emplea para el cálculo del componente difuso y directo del sol. Este último requiere de la especificación de una fecha y hora para establecer la posición del sol.

Debido a que los datos de radiación solar disponibles en los ficheros del clima son obtenidos típicamente de planos horizontales, Ecotect emplea el ángulo formado entre el objeto de análisis y el sol para la hora definida por el usuario, con el fin de determinar el ángulo de incidencia sobre el objeto. Este ángulo de incidencia será empleado para calcular la cantidad total de radiación solar sobre esa superficie.

Es importante recordar que la radiación directa es aquella que proviene directamente desde el sol. A su vez, la radiación difusa es aquella que se captura de la atmósfera a raíz de la dispersión de la radiación del sol sobre esta (Naqi, 2006). Este tipo de radiación se ve incrementada en zonas nubladas, con ambientes de polución o en zonas de latitudes mayores, donde se reduce la cantidad de radiación directa disponible. Por otro lado, las superficies horizontales reciben mayor radiación difusa por cuanto pueden ver toda la semiesfera celeste, mientras que las superficies verticales solo ven la mitad de la semiesfera. La radiación total es la suma de la radiación directa y difusa.

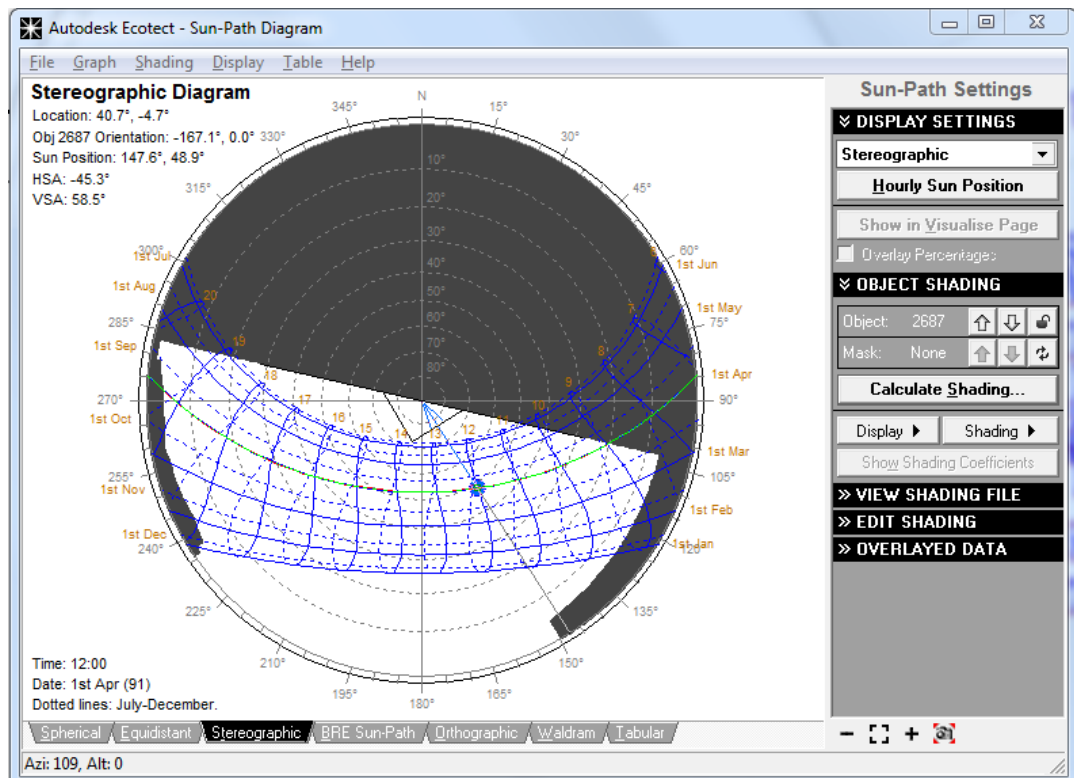


Figura 12 - Representación de una máscara de ensombrecimiento (shading mask)

Para poder emplear este software, se hace necesario exportar cada uno de los modelos tridimensionales de las zonas de estudio obtenidos con el Software CityEngine a un formato tipo Wavefront .OBJ, de tal forma que Ecotect pueda interpretar la geometría de cada uno de los objetos que representan la fachadas y tejados de las edificaciones.

A su vez, con el fin de llevar a cabo la simulación de la posición del sol, proyección de sombras, y cálculo de la radiación sobre el modelo, Ecotect emplea un fichero del clima "Weather File" el cual se obtuvo de un banco de datos del Departamento de Energía de los Estados Unidos (USDE, 2015), el cual reúne información del clima para un año típico a partir de observaciones recopiladas durante más de 30 años, proveniente de diversas fuentes oficiales, en formato EnergyPlus Weather (.epw).

Para el caso de la zona de estudio, esta información parte de un programa de eficiencia energética para las edificaciones, recopilado para las 52 capitales de provincias españolas, denominado SWEC (en inglés Spanish Weather for Energy Calculations).

Estos datos fueron compilados por el Grupo de Termotecnia de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, para el Gobierno Español, a partir de la recopilación de los mismos, por parte de la AEMET (i.e. antiguo Instituto Nacional Meteorológico). De acuerdo a la información asociada a los ficheros, los archivos del clima fueron generados con la ayuda del software portugués denominado “Climed”, a partir de datos medios mensuales. Estos ficheros fueron convertidos de un formato binario DOE-2 al formato EnergyPlus, siendo este último el que se encuentra disponible en el portal del USDE.

A pesar que Ecotect recurre a un fichero .EPW, requiere de su conversión previa a un formato denominado Weather Data File (.wea), para lo cual emplea una herramienta disponible dentro del mismo software, llamada “Convert Weather Data”. Con base en lo anterior se convierte el fichero “ESP\_Avila.082100\_SWEC.epw” al formato .wea. La Figura 13, representa los datos del clima disponibles para el casco urbano de la provincia de Ávila, España.

Posteriormente, es importada la zona de estudio, como un objeto CAD de geometría 3D, seleccionando como tipo de objeto la extensión .OBJ y definiendo la ruta de almacenamiento del fichero. Es importante definir la escala de los objetos a importar, de tal forma que para este caso en particular todos los elementos se encuentran representados en metros, y deben dibujarse en milímetros (opción meters – millimeters). Con el fin de facilitar el análisis, se define que los objetos sean importados por zonas, de acuerdo al nombre que identifica cada polígono (i.e. Import by Item name), según lo ha generado CityEngine, como se ilustra en la Figura 14.

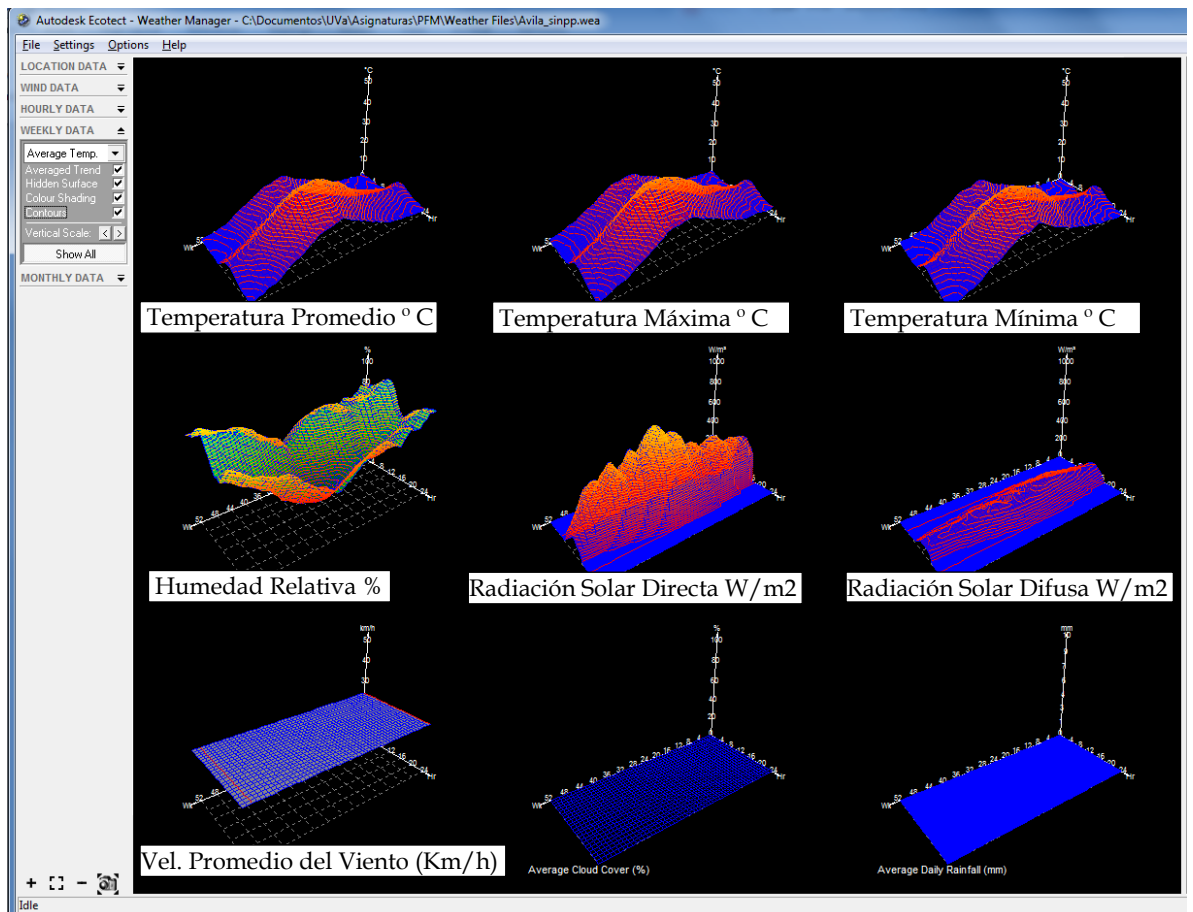


Figura 13 - Representación datos climáticos del casco urbano de Ávila, España

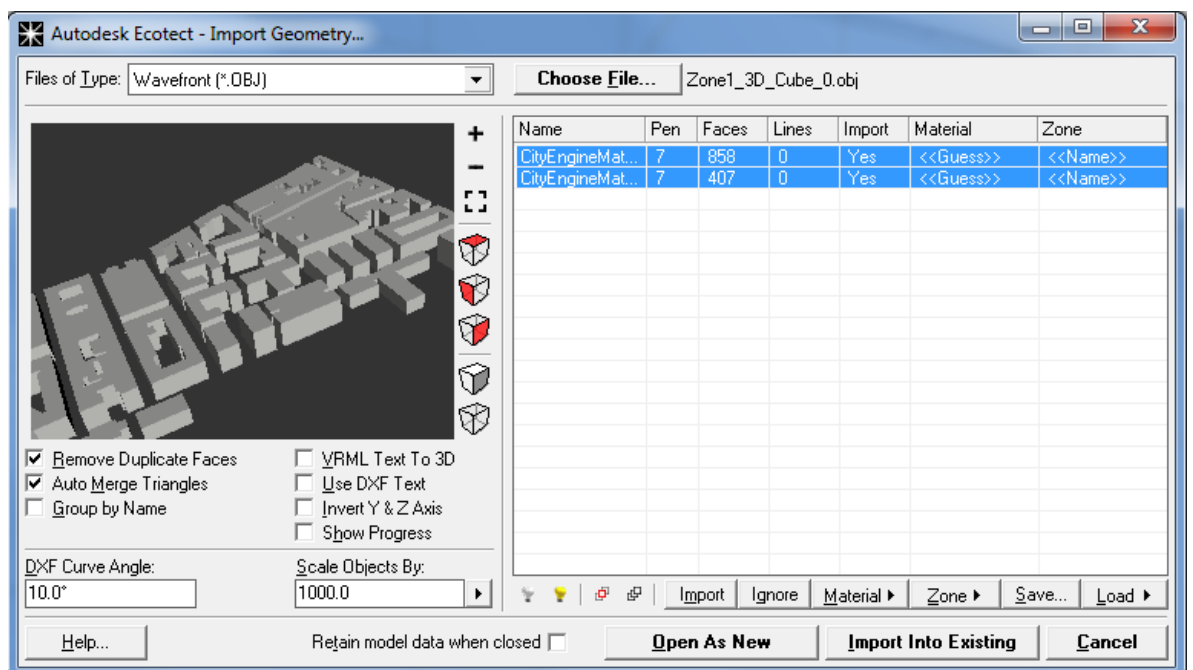


Figura 14 - Importar a Autodesk Ecotect un modelo tridimensional en formato .OBJ

Una vez se importa el modelo tridimensional de la zona de estudio, se procede a asociar el fichero de datos del clima (i.e. weather data file) en la opción "Load Weather File" del menú principal de Autodesk Ecotect. De esta manera se permite ejecutar el análisis de acceso solar (i.e. en inglés solar access analysis), para calcular la radiación solar incidente sobre los objetos que representan las edificaciones de cada una de las zonas de interés.

Con el fin de estimar la radiación solar total, directa, y difusa sobre las fachadas y tejados, se definieron cuatro períodos estacionales de referencia. De esta manera se ejecutó el análisis de radiación solar para las cuatro estaciones del año: primavera (Abril - Mayo), verano (Junio - Septiembre), Otoño (Octubre - Noviembre) e Invierno (Diciembre - Marzo). A su vez, fue necesario especificar una franja horaria en la cual eventualmente se realizará la captura de radiación solar, que corresponde entre las 08:00 - 19:00. En definitiva la radiación calculada será un valor acumulado total entre las horas y meses en relación. Consecuentemente se conocerá cuanta radiación se puede aprovechar en total por cada estación del año (diferenciando entre radiación solar total, directa o difusa), para cada una de las edificaciones existentes en las zonas de interés.

Por otro lado, Ecotect cuenta con una herramienta denominada "Shadow Settings" que representa la trayectoria diaria y anual del sol, así como las sombras proyectadas sobre el terreno, a partir del modelo tridimensional de las edificaciones. De esta manera se puede generar una animación tanto de la trayectoria del sol, y de las sombras que eventualmente influirán sobre la disponibilidad de radiación solar en zonas aledañas.

Una vez se obtuvieron los resultados, se procedió a su depuración y análisis, con la ayuda de una hoja de cálculo en Microsoft Excel por el volumen de valores obtenidos, ante la gran densidad de polígonos a evaluar. A su vez, con la ayuda de Autodesk Ecotect, de acuerdo a los resultados de mayor radiación solar total sobre cada una de las zonas de estudio, se procedió a calcular las sombras proyectadas para el día 15 de Julio en el rango de horas potenciales de sol, comprendido entre las 09:00 y 17:00, con un intervalo de 30 minutos, siendo esta fecha un indicador del comportamiento general de las sombras sobre las edificaciones circundantes, así como eventuales efectos sobre el potencial solar.



## 6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez se llevaron a cabo todos los cálculos, fueron desplegados los resultados que se registran en la Tabla 1, Tabla 2, Tabla 3, y Tabla 4. La representación gráfica de la radiación total sobre cada una de las superficies que representan las fachadas y tejados se ilustran en las Figura 18 - Figura 33.

Tabla 1 - Radiación Total, Directa y Difusa calculada para la Zona 1

Período	Superficie	Área (m <sup>2</sup> )	Radiación Total (Wh/m <sup>2</sup> )	Radiación Directa (Wh/m <sup>2</sup> )	Radiación Difusa (Wh/m <sup>2</sup> )
ABR - MAY (Primavera)	C+W	170,603	791,545,653	489,238,555	302,307,097
	C	59,068	723,507,062	458,633,603	264,873,459
	W	111,535	68,038,591	30,604,952	37,433,639
JUN - SEP (Verano)	C+W	170,603	1,873,420,449	1,361,039,794	512,380,655
	C	59,068	1,728,480,887	1,279,585,051	448,895,835
	W	111,535	144,939,563	81,454,743	63,484,820
OCT - NOV (Otoño)	C+W	170,603	388,973,305	242,446,213	146,527,092
	C	59,068	341,867,197	214,246,095	127,621,101
	W	111,535	47,106,109	28,200,117	18,905,991
DIC - MAR (Invierno)	C+W	170,603	723,771,636	400,249,659	323,521,976
	C	59,068	636,094,503	354,315,685	281,778,818
	W	111,535	87,677,133	45,933,974	41,743,158

Nota: C+W=Tejados + Fachadas, C=Tejados, W=Fachadas

Tabla 2 - Radiación Total, Directa y Difusa calculada para la Zona 2

Período	Superficie	Área (m <sup>2</sup> )	Radiación Total (Wh/m <sup>2</sup> )	Radiación Directa (Wh/m <sup>2</sup> )	Radiación Difusa (Wh/m <sup>2</sup> )
ABR-MAY (Primavera)	C+W	87,319	603,101,887	370,380,095	232,721,791
	C	45,972	537,200,011	338,238,423	198,961,587
	W	41,347	65,901,876	32,141,672	33,760,204
JUN-SEP (Verano)	C+W	87,319	1,422,789,687	1,028,383,073	394,406,613
	C	45,972	1,279,148,058	941,956,750	337,191,309
	W	41,347	143,641,629	86,426,324	57,215,305
OCT-NOV (Otoño)	C+W	87,319	532,978,715	340,170,589	192,808,127
	C	45,972	482,999,218	307,005,385	175,993,834
	W	41,347	49,979,497	33,165,204	16,814,293
DIC-MAR (Invierno)	C+W	87,319	595,935,928	340,020,534	255,915,394
	C	45,972	504,253,429	285,462,862	218,790,567
	W	41,347	91,682,500	54,557,673	37,124,827

Tabla 3 - Radiación Total, Directa y Difusa calculada para la Zona 3

Período	Superficie	Área (m <sup>2</sup> )	Radiación Total (Wh/m <sup>2</sup> )	Radiación Directa (Wh/m <sup>2</sup> )	Radiación Difusa (Wh/m <sup>2</sup> )
ABR-MAY (Primavera)	C+W	104,958.30	949,652,619	580,571,420	369,081,198
	C	30,802	850,733,797	537,398,742	313,335,054
	W	74,156	98,918,821	43,172,678	55,746,144
JUN-SEP (Verano)	C+W	104,958	2,237,032,772	1,611,530,277	625,502,495
	C	30,802	2,026,388,484	1,495,362,088	531,026,397
	W	74,156	210,644,287	116,168,189	94,476,098
OCT-NOV (Otoño)	C+W	104,958	505,273,887	321,452,769	183,821,118
	C	30,802	428,964,263	272,907,547	156,056,716
	W	74,156	76,309,624	48,545,222	27,764,401
DIC-MAR (Invierno)	C+W	104,958	936,590,552	530,725,870	405,864,682
	C	30,802	796,122,487	451,559,738	344,562,749
	W	74,156	140,468,065	79,166,132	61,301,933

Tabla 4 - Radiación Total, Directa y Difusa calculada para la Zona 4

Período	Superficie	Área (m <sup>2</sup> )	Radiación Total (Wh/m <sup>2</sup> )	Radiación Directa (Wh/m <sup>2</sup> )	Radiación Difusa (Wh/m <sup>2</sup> )
ABR-MAY (Primavera)	C+W	220,930	585,590,463	360,873,487	224,716,976
	C	176,229	514,003,618	325,111,892	188,891,725
	W	44,701	71,586,845	35,761,594	35,825,251
JUN-SEP (Verano)	C+W	220,930	1,379,532,385	998,691,995	380,840,389
	C	176,229	1,221,861,629	901,736,289	320,125,339
	W	44,701	157,670,756	96,955,706	60,715,051
OCT-NOV (Otoño)	C+W	222,505	332,352,290	216,577,159	115,775,132
	C	177,804	277,095,258	179,123,240	97,972,018
	W	44,701	55,257,033	37,453,918	17,803,114
DIC-MAR (Invierno)	C+W	222,505	612,999,681	357,375,959	255,623,723
	C	177,804	511,349,719	295,034,078	216,315,641
	W	44,701	101,649,962	62,341,880	39,308,082

De acuerdo a los resultados de la radiación calculada para cada una de las zonas, se observó lo siguiente:

Los mayores niveles de radiación solar total (directa y difusa) se alcanzan durante la época de verano para cada una de las zonas de estudio; siendo la Zona 3 en donde se alcanza el mayor potencial de aprovechamiento de energía solar (2,237 MWh/m<sup>2</sup>) a partir de su evaluación sobre tejados y fachadas para esta época. Por otro lado la zona con menor potencial de radiación solar total es la Zona 4, en donde se alcanza un valor de 1,380 MWh/m<sup>2</sup>.

Referente a la época de invierno (Diciembre-Marzo), el máximo valor de radiación solar total obtenido alcanza los 937 MWh/m<sup>2</sup> para la Zona 3, y el menor valor lo obtiene la Zona 2 (596 MWh/m<sup>2</sup>). A su vez, durante la primavera (Abril - Mayo) vuelve a ser la Zona 3 la que alcanza el mayor nivel de radiación solar total (950 MWh/m<sup>2</sup>), y el menor registro de radiación solar total lo obtiene la Zona 4 (586 MWh/m<sup>2</sup>).

Finalmente durante la época de Otoño (Octubre - Noviembre), el mayor potencial de radiación solar total se encuentra en la Zona 2 (533 MWh/m<sup>2</sup>), y nuevamente es la Zona 4 aquella con la menor cantidad de radiación solar total disponible (332 MWh/m<sup>2</sup>). El comportamiento general de la radiación solar total para cada una de las Zonas de estudio y épocas del año, se ilustra en la Figura 15.

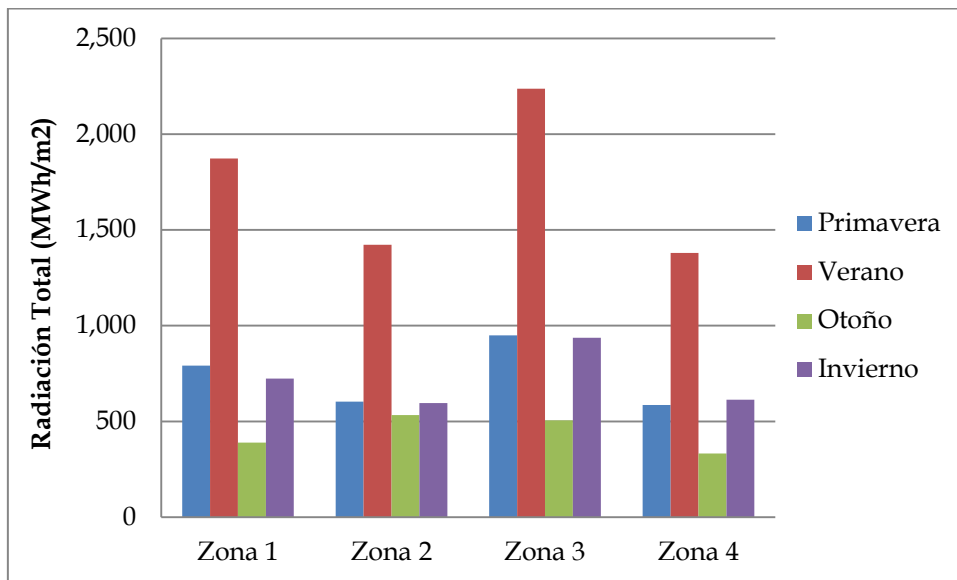


Figura 15 - Radiación solar total para cada una de las épocas del año

Con respecto a la radiación solar directa se observa claramente como aporta mayor cantidad de energía en comparación con la radiación difusa; de allí que exista un comportamiento similar de la tendencia de los datos con respecto a la radiación total (Figura 16).

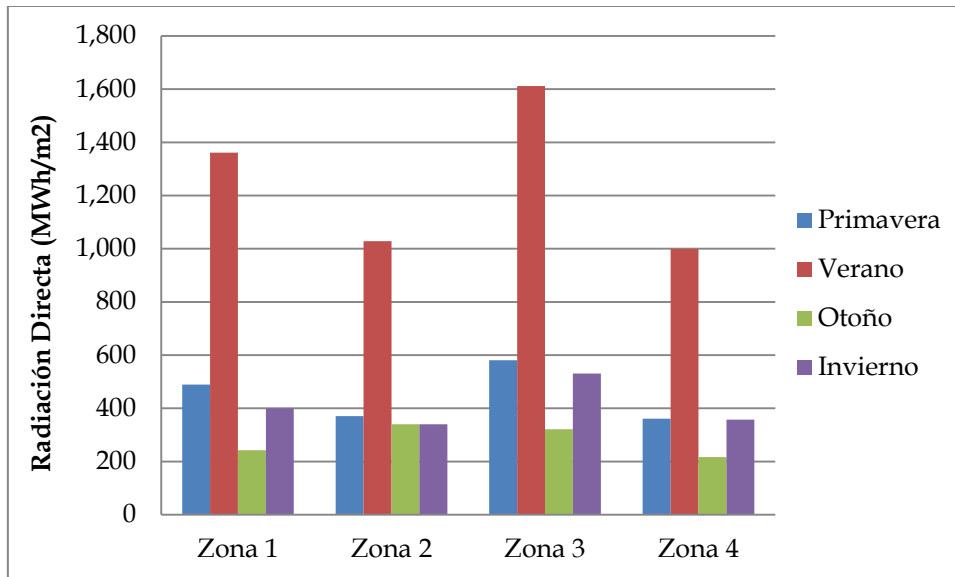


Figura 16 – Radiación solar directa para cada una de las épocas del año

Para el caso de la radiación solar difusa, sigue destacándose la Zona 3 como la de mayor potencial de generación de energía para casi todas las épocas del año, no obstante los márgenes de diferencia en la cantidad de radiación difusa disponible entre las zonas es menor con respecto a la directa.

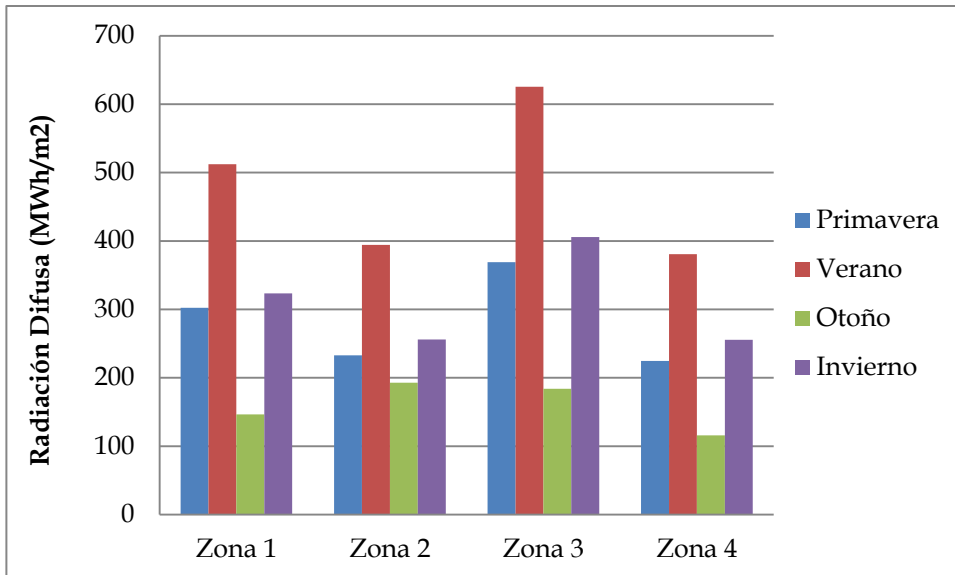


Figura 17 – Radiación solar difusa para cada una de las épocas del año

En cuanto al modelamiento tridimensional de la radiación sobre cada una de las superficies en las diferentes zonas de estudios, visualmente representan los mayores rangos de radiación total solar asociados principalmente a los tejados, por cuanto reciben mayor cantidad de radiación solar a lo largo del día con poca influencia de sombras. No obstante lo anterior, las fachadas pueden recuperar una cantidad considerable de radiación, eventualmente útil en las consideraciones de diseño de un sistema de aprovechamiento de la energía solar en un entorno urbano, limitado por el espacio disponible y la proyección de sombras debido a objetos aledaños. Por la ubicación geográfica particular, cada zona de estudio presenta un potencial de radiación solar total diferente, según la época del año, tal como se muestra en las Figura 18 - Figura 33.

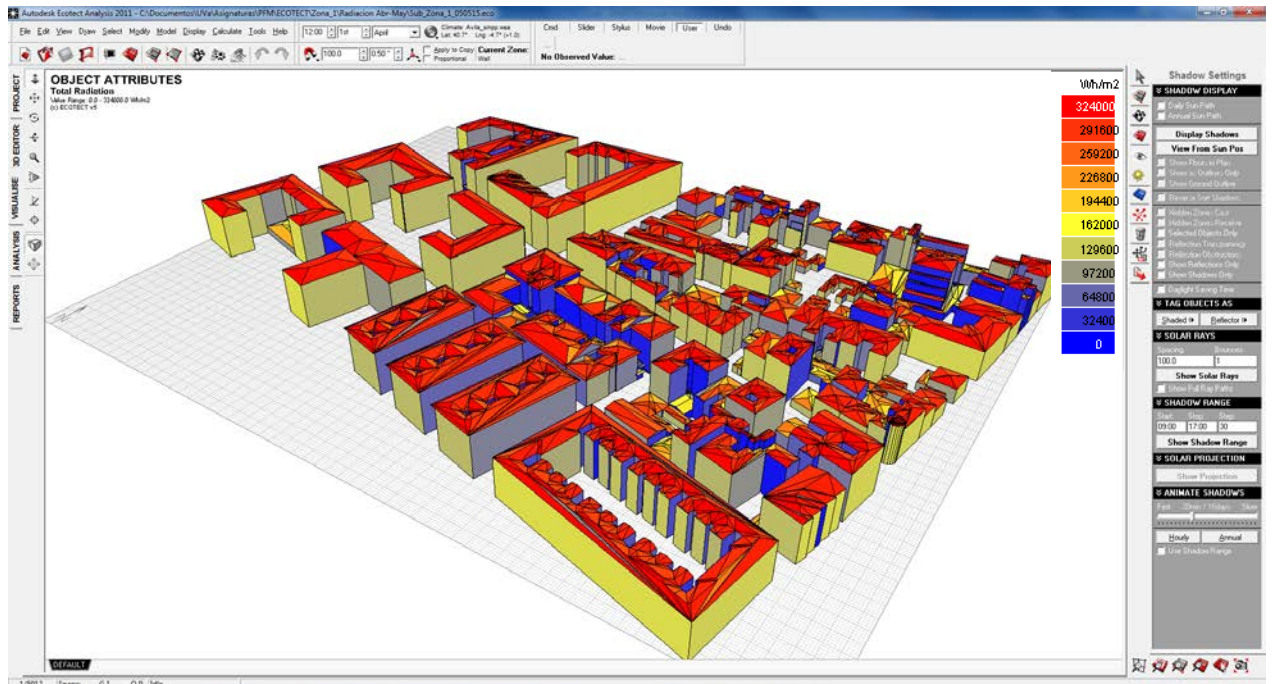


Figura 18 - Radiación Total calculada para primavera en la Zona 1

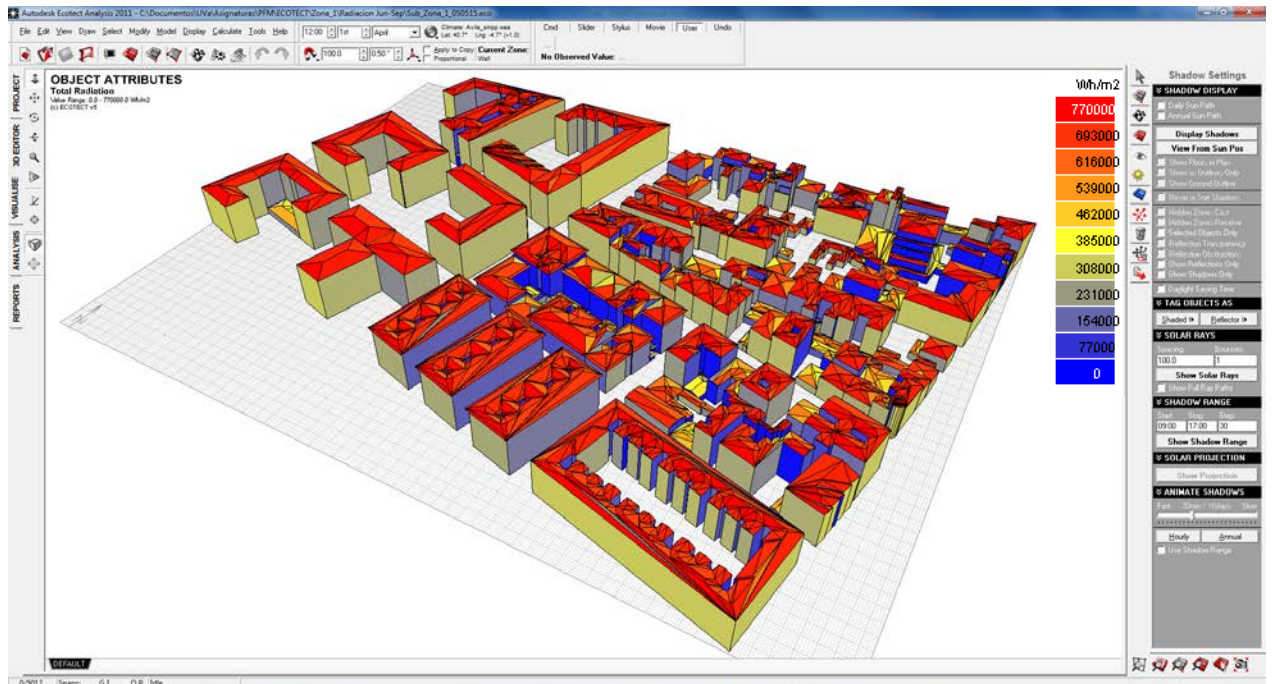


Figura 19 - Radiación Total calculada para verano en la Zona 1

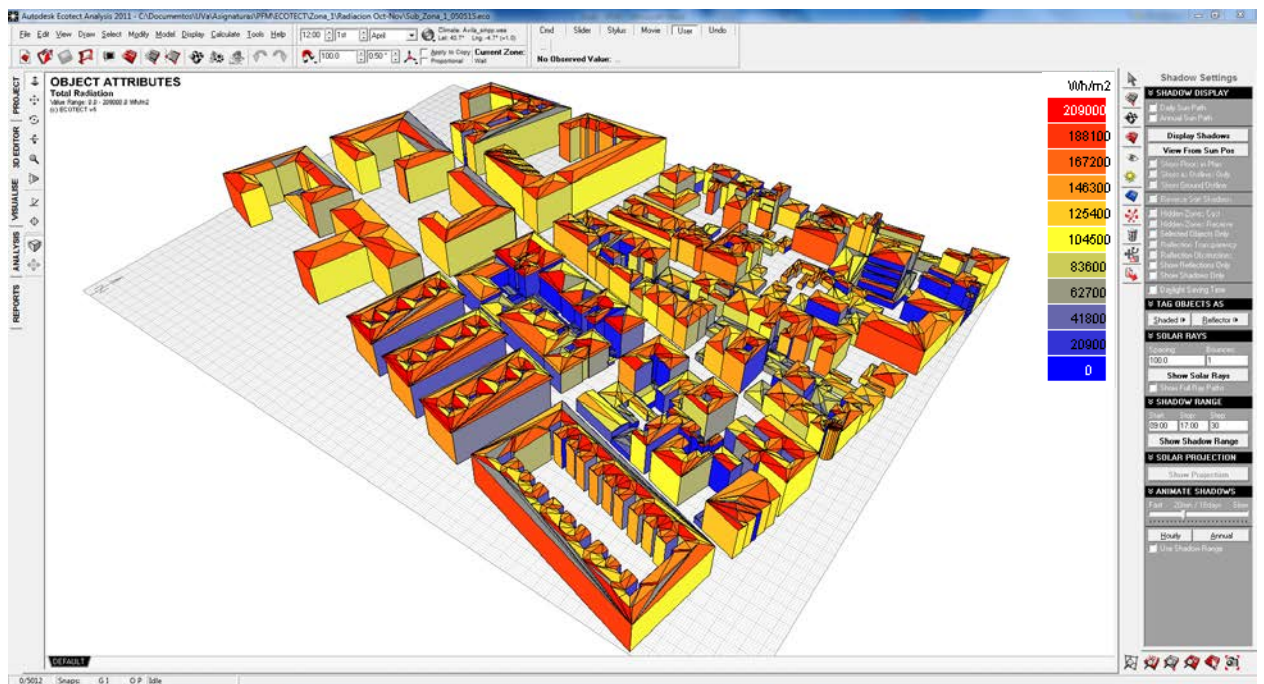


Figura 20 - Radiación Total calculada para otoño en la Zona 1

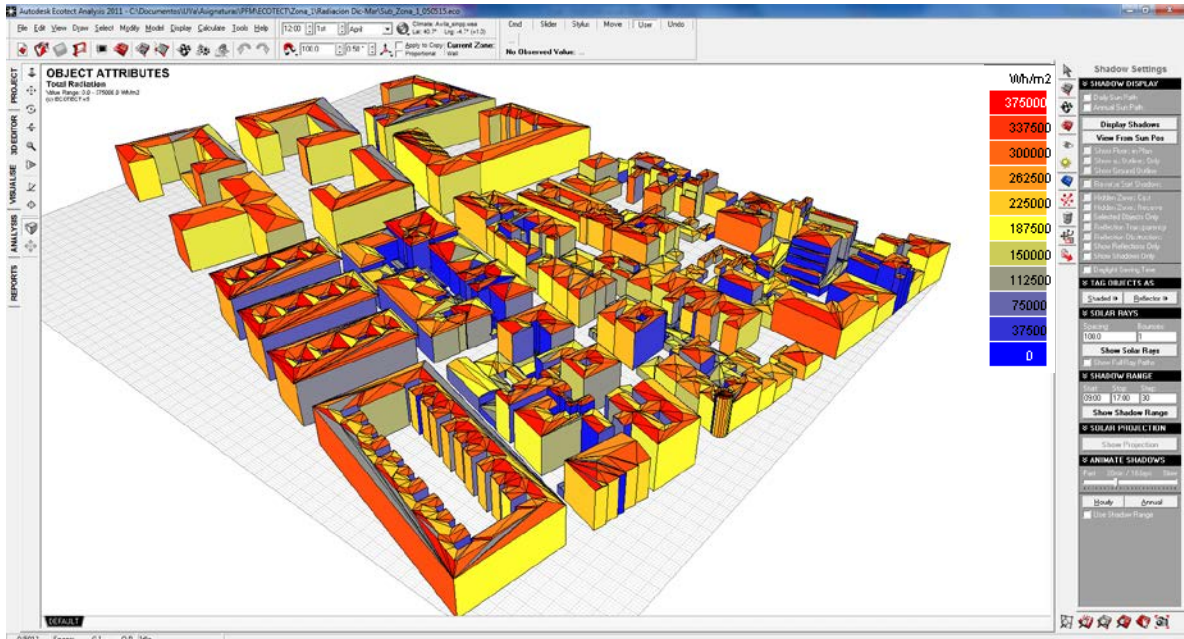


Figura 21 - Radiación Total calculada para invierno en la Zona 1

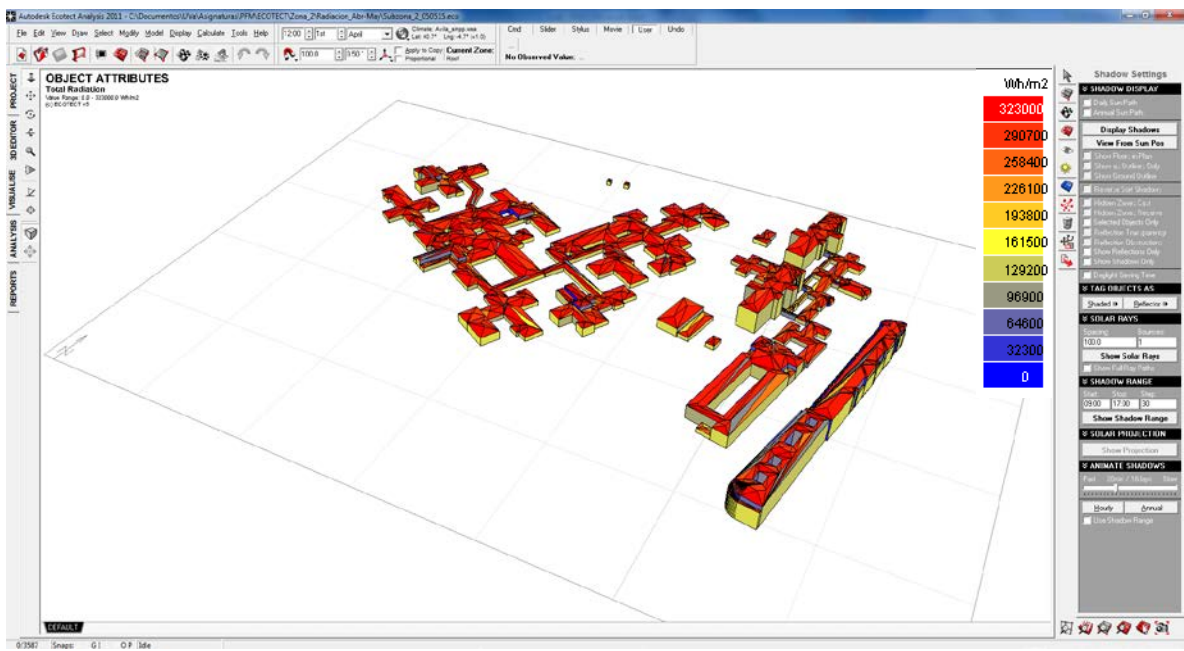


Figura 22 - Radiación Total calculada para la primavera en la Zona 2

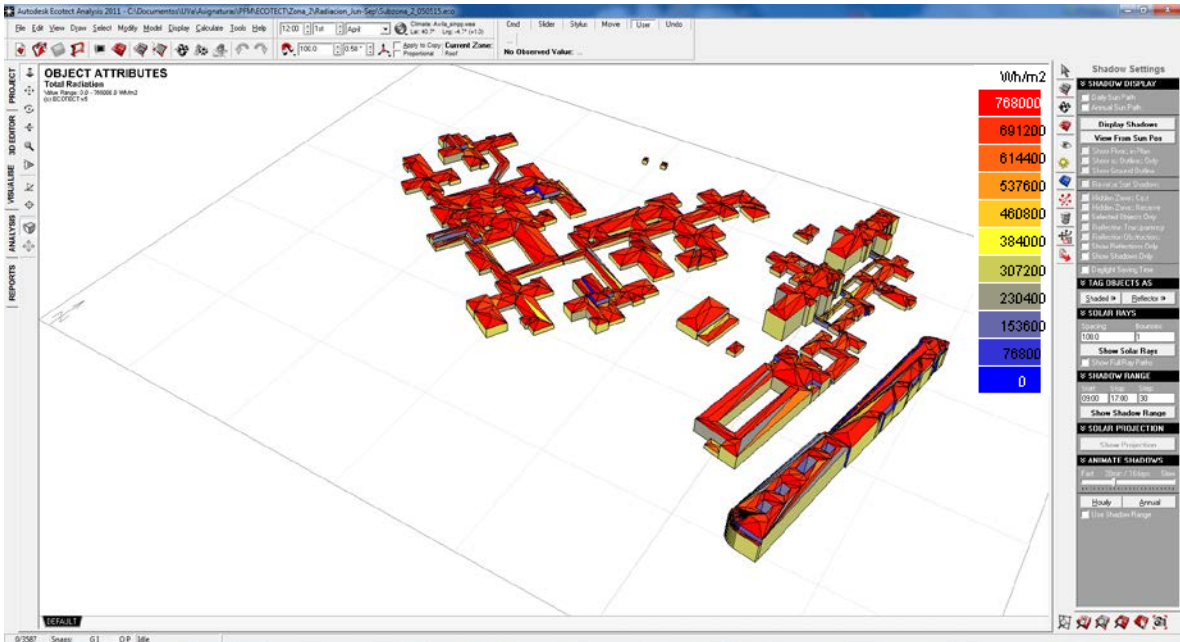


Figura 23 - Radiación Total calculada para verano en la Zona 2

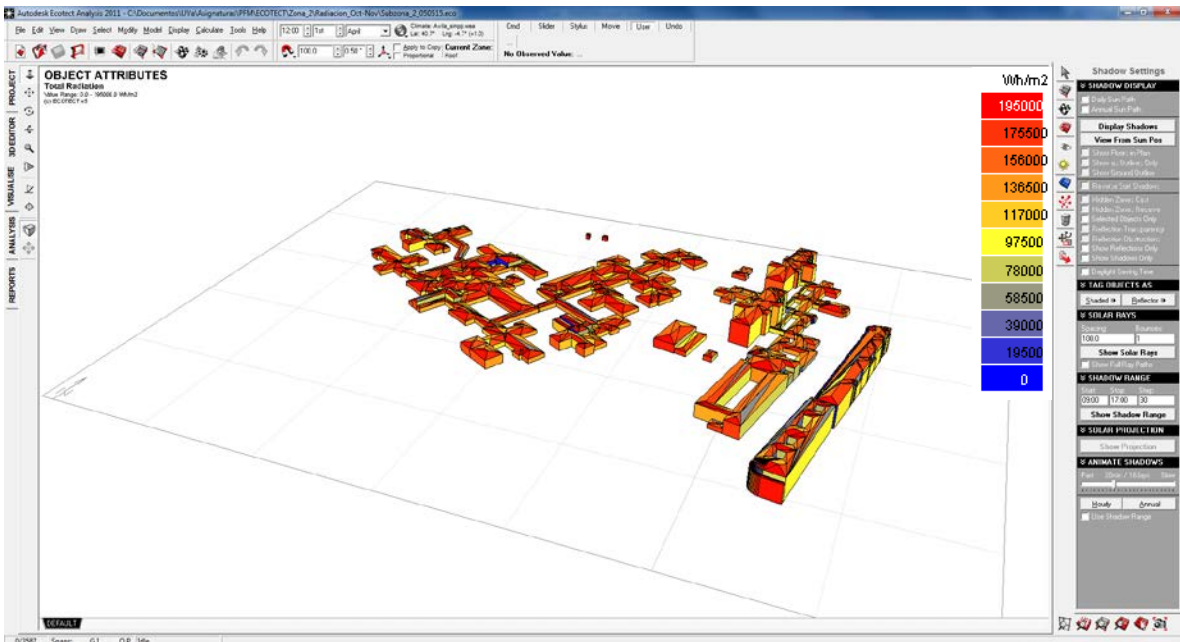


Figura 24 - Radiación Total calculada para otoño en la Zona 2



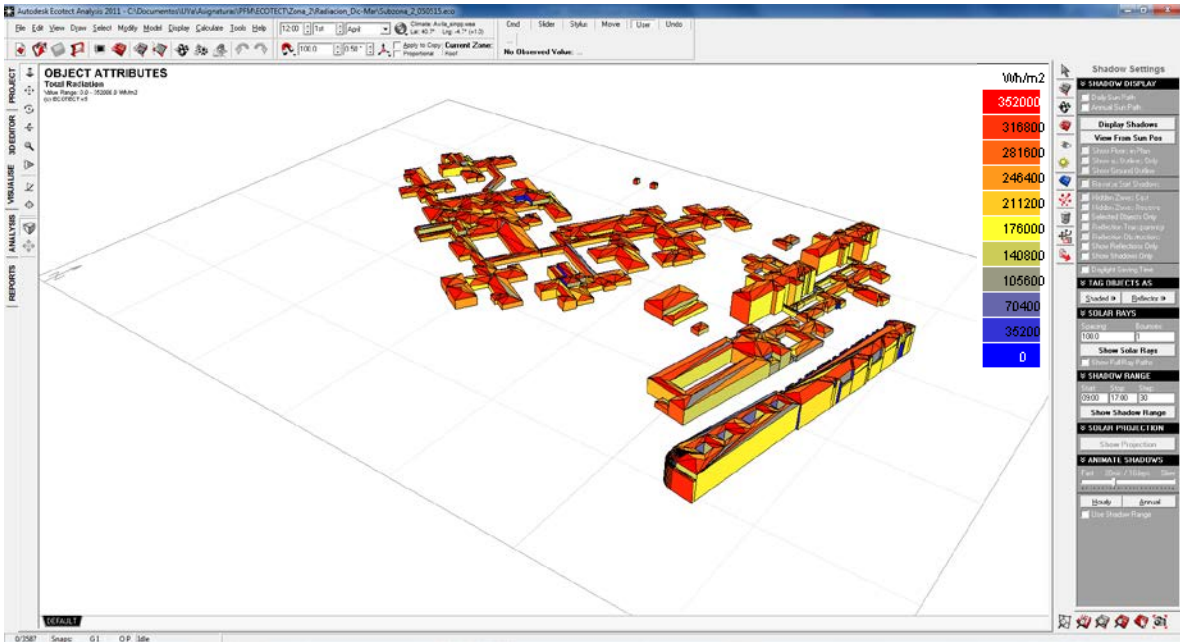


Figura 25 - Radiación Total calculada para invierno en la Zona 2

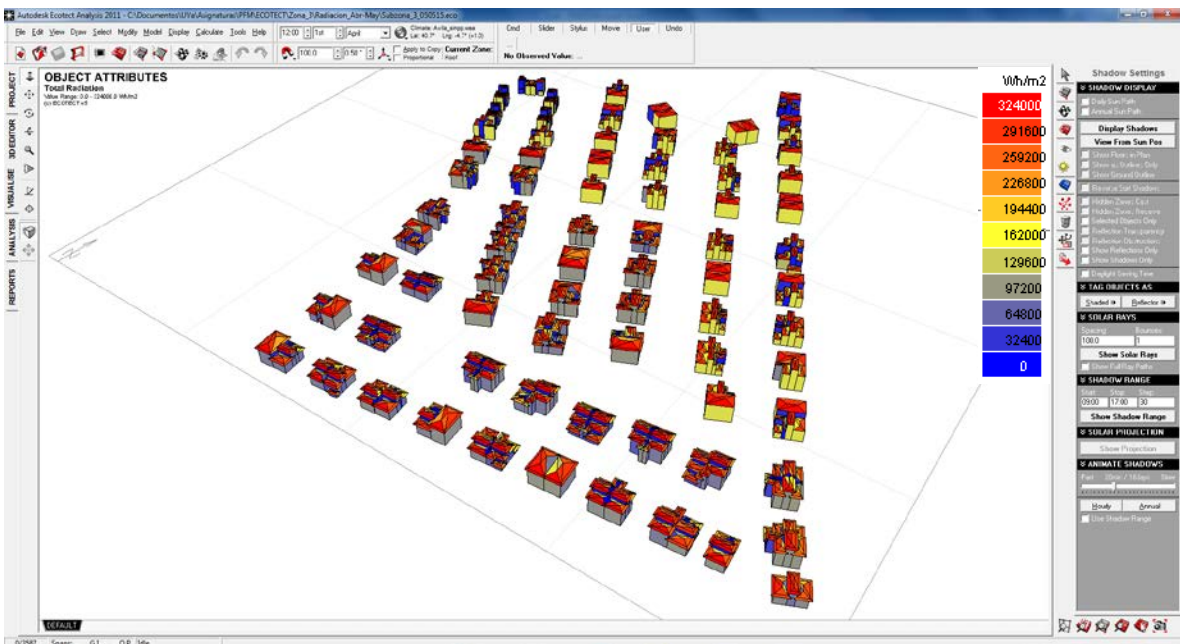


Figura 26 - Radiación Total calculada para primavera en la Zona 3

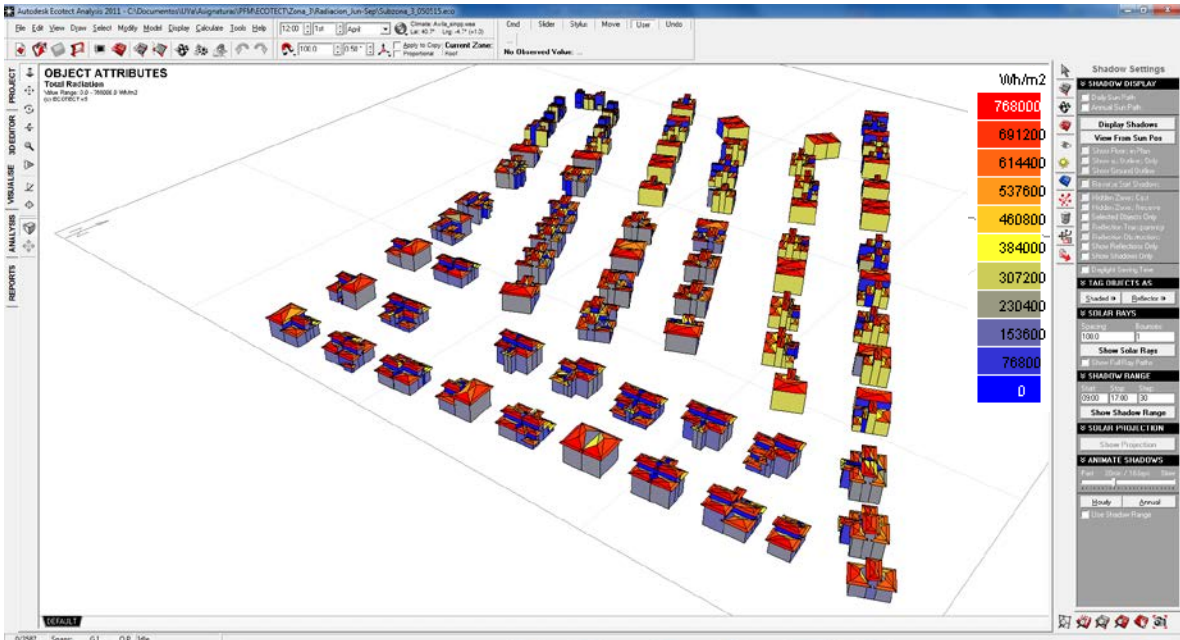


Figura 27 - Radiación Total calculada para verano en la Zona 3

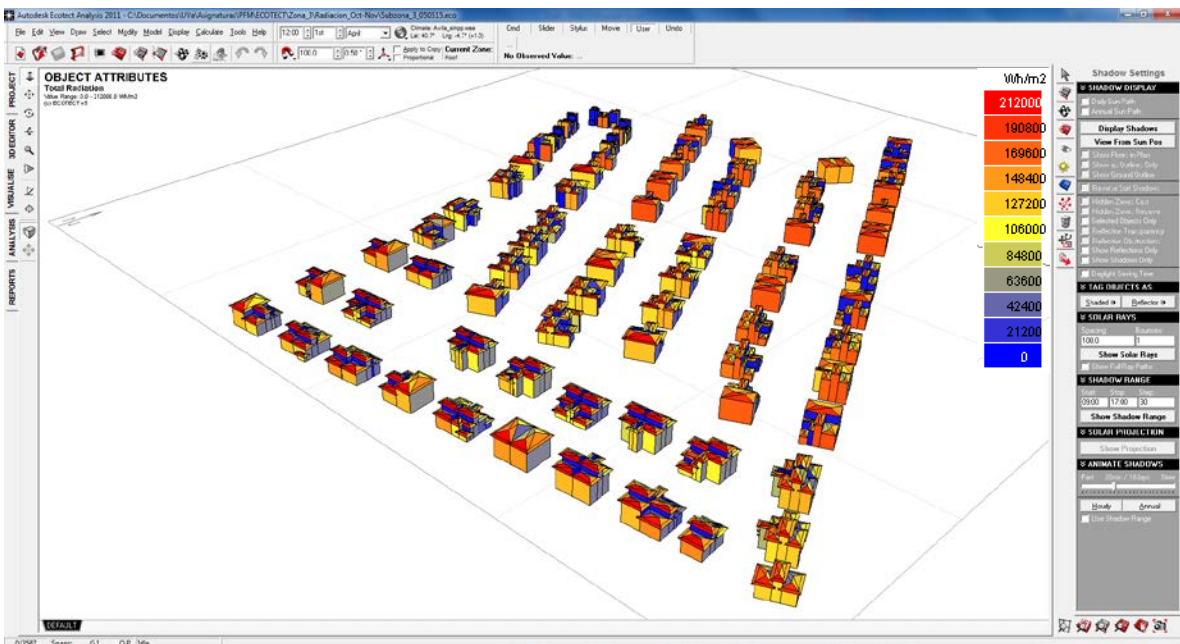


Figura 28 - Radiación Total calculada para otoño en la Zona 3

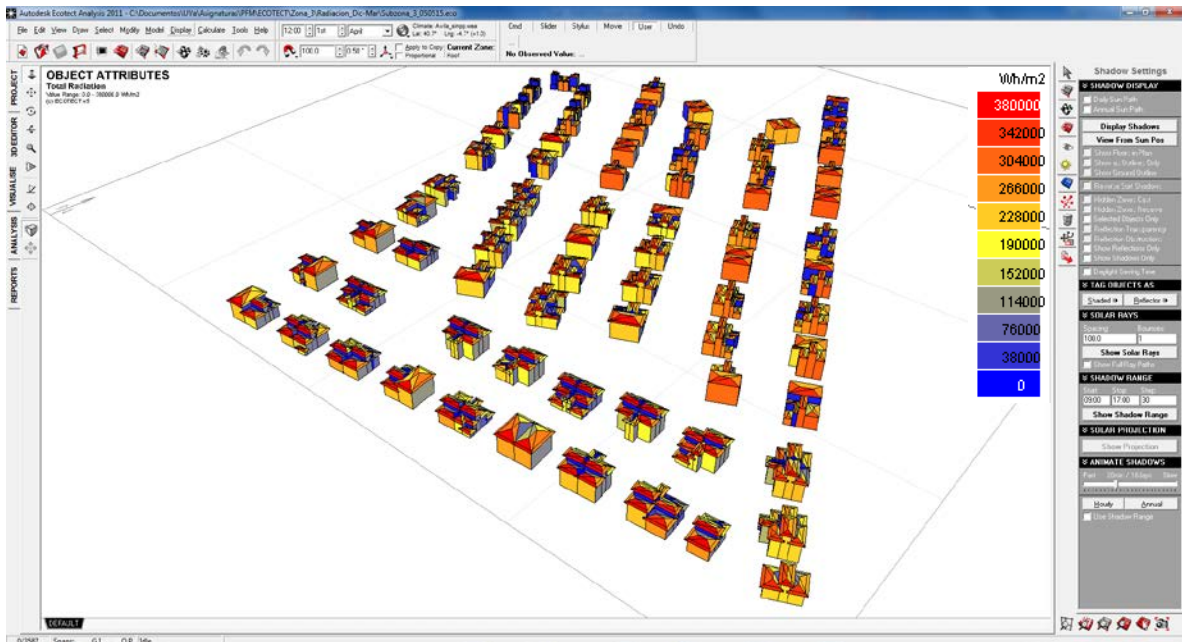


Figura 29 - Radiación Total calculada para invierno en la Zona 3

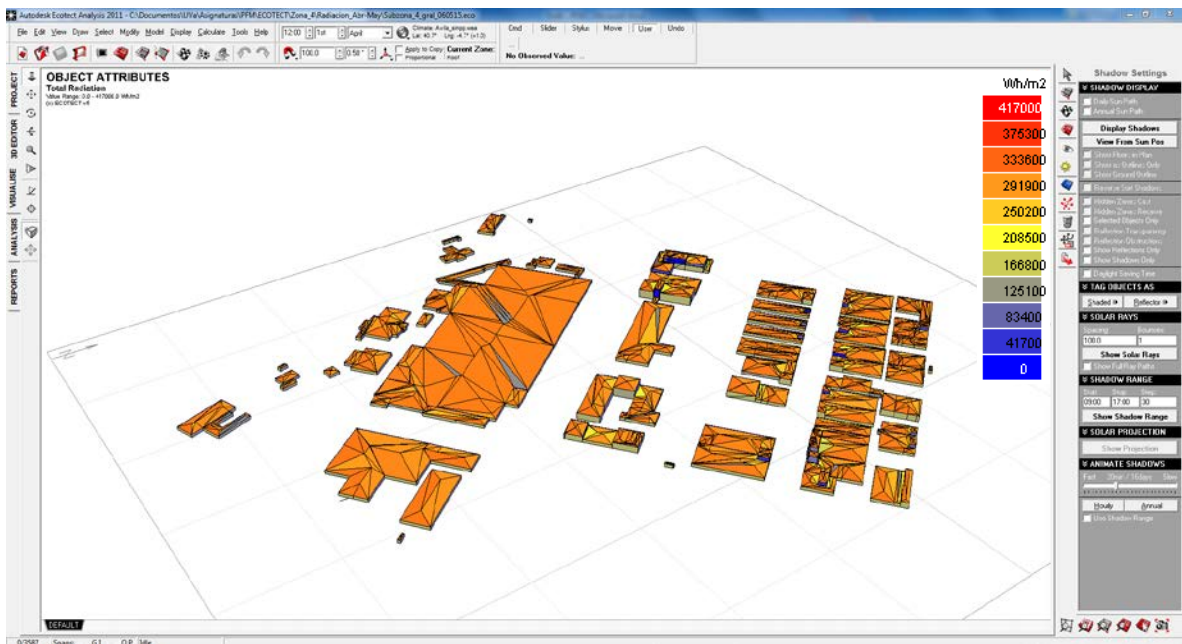


Figura 30 - Radiación Total calculada para primavera en la Zona 4

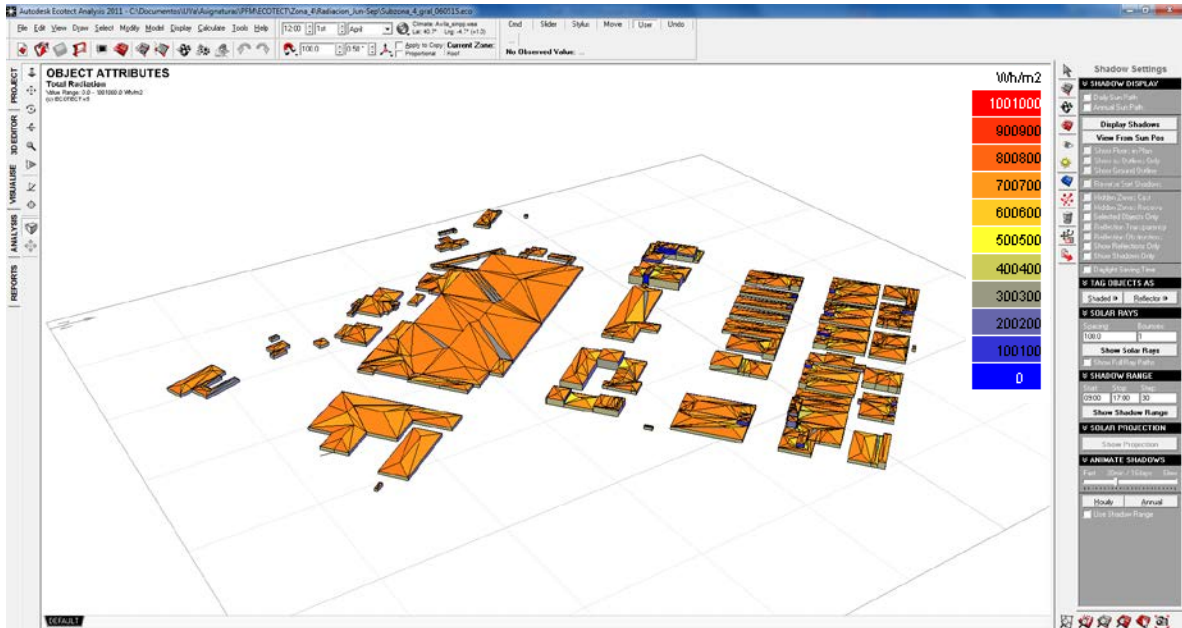


Figura 31 - Radiación Total calculada para verano en la Zona 4

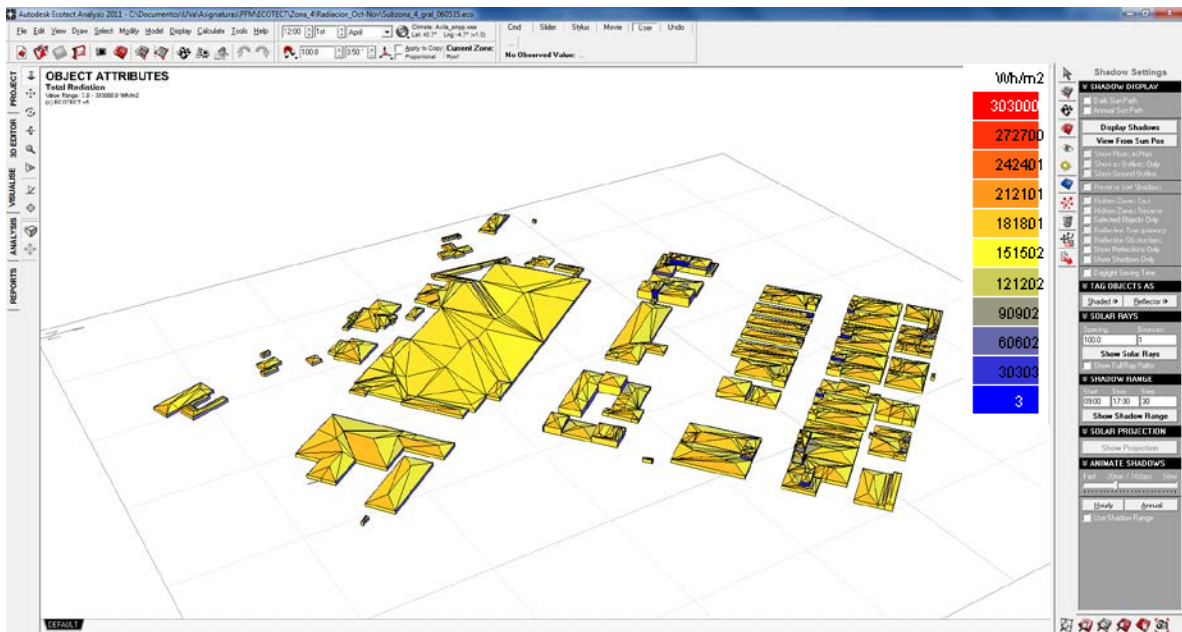


Figura 32 - Radiación Total calculada para otoño en la Zona 4

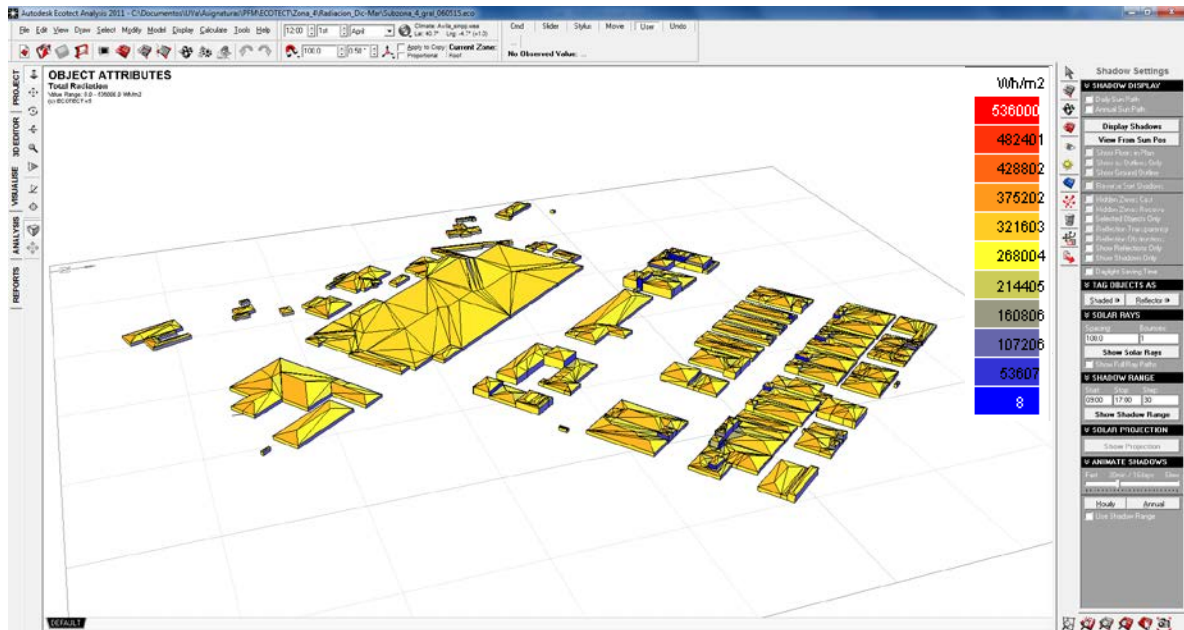


Figura 33 - Radiación Total calculada para invierno en la Zona 4

### 6.1 Caso Particular: comparación del modelo original (Zona 1) con el modelo depurado de (Zona 1A)

Como resultado de la generalización del plano catastral de las edificaciones existentes en la Zona 1, y su posterior empleo en el cálculo de la radiación solar total, directa y difusa, se obtuvieron los resultados relacionados en la Tabla 5.

Período	Superficie	Área (m <sup>2</sup> )	Radiación Total (Wh/m <sup>2</sup> )	Radiación Directa (Wh/m <sup>2</sup> )	Radiación Difusa (Wh/m <sup>2</sup> )
ABR-MAY (Primavera)	C+W	159,747	337,476,720	201,238,336	136,238,384
	C	55,454	256,465,993	161,859,884	94,606,109
	W	104,293	81,010,727	39,378,452	41,632,275
JUN-SEP (Verano)	C+W	159,747	785,427,127	554,536,331	230,890,797
	C	55,454	610,247,631	449,913,378	160,334,254
	W	104,293	175,179,496	104,622,954	70,556,543
OCT-NOV (Otoño)	C+W	159,747	186,229,665	118,376,053	67,853,611
	C	55,454	130,835,491	83,716,860	47,118,631
	W	104,293	55,394,174	34,659,194	20,734,980
DIC-MAR (Invierno)	C+W	159,747	344,344,375	194,528,156	149,816,218
	C	55,454	242,338,765	138,303,992	104,034,773
	W	104,293	102,005,610	56,224,164	45,781,446

Tabla 5 - Radiación Total, Directa y Difusa calculada para la Zona 1A

De acuerdo a los valores de radiación total existente sobre la Zona 1A, se identificaron los meses comprendidos entre Jun.-Sep. (Verano) y Dic.-Mar. (Invierno) como los de mayor potencial, y los comprendidos entre Oct.-Nov. (Otoño), como aquellos en los cuales los niveles de radiación solar total son inferiores a 190 MWh/m<sup>2</sup>. La Zona 1A conserva un comportamiento evidenciado en las Zonas 1 y 3, en donde los tejados recuperan la mayor cantidad de radiación solar, incluso a pesar de tener menor área disponible con respecto a las fachadas.

Los valores de radiación directa obtenidos, conservan el comportamiento de la radiación total, siendo la mayor aportar en proporción, con respecto a la difusa. La principal diferencia radica en que es la primavera y no el invierno la segunda época del año con mayores niveles de radiación solar directa. Finalmente en cuanto a la radiación solar difusa, aunque en una proporción muy baja, el comportamiento es similar al de la radiación total para todas las épocas del año.

Luego de obtener los valores de radiación solar total, directa y difusa, se procedió a comparar los modelos de la Zona 1 y Zona 1A en términos de resultados obtenidos y definir eventuales efectos debido a la generalización de los planos de las huellas de los edificios. El comportamiento general de la radiación solar total, directa y difusa para cada una de las Zonas de estudio y épocas del año, se ilustra en la Figura 34, Figura 35 y Figura 36.

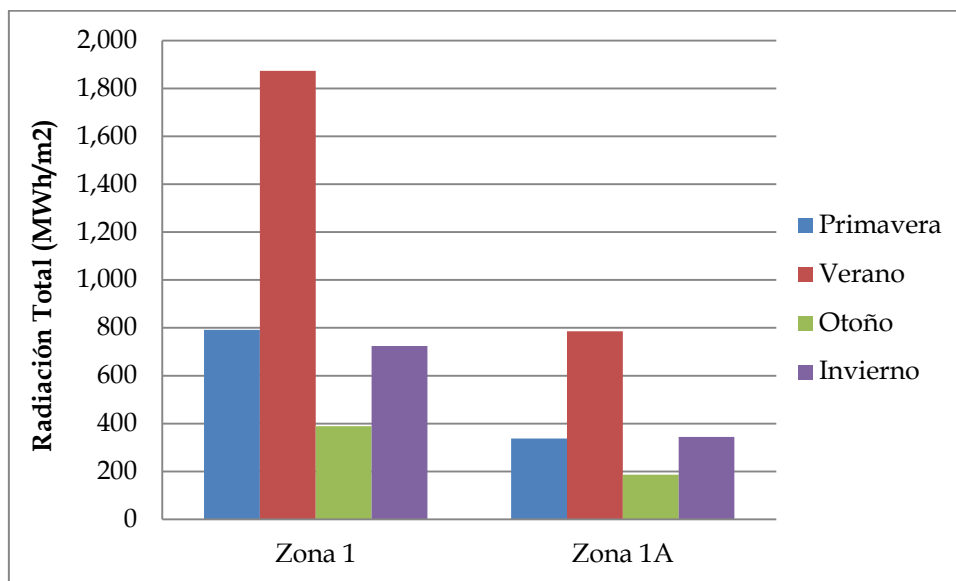


Figura 34 - Comparación de la radiación solar total entre Zona 1 y Zona 1A

Al analizar cada uno de los resultados de radiación solar total, directa y difusa en función de diferentes épocas del año, es claro como la generalización de las huellas de las edificaciones conlleva una reducción del potencial de radiación solar en más de la mitad. Así por ejemplo, para el caso del verano, se pasa de 1,873 MWh/m<sup>2</sup> en la Zona 1, a 785 MWh/m<sup>2</sup> en la Zona 1A. En esa medida, todas las épocas del año experimentan una decaída en los niveles de radiación, sin importar que sea de tipo directa o difusa.

Otro aspecto a tener en cuenta es la diferencia existente entre el área total calculada para tejados y fachadas entre la Zona 1 (170,603 m<sup>2</sup>) y la Zona 1A (159,747 m<sup>2</sup>). Aunque se supondría que el área disponible para calcular los potenciales de radiación deberían ser los mismos o al menos muy parecidos, la reducción en el número de puntos que definen cada polígono de las edificaciones conllevó a establecer un decrecimiento del 6% del área disponible, que asciende a más de 10,800 m<sup>2</sup>. Esto podría explicar la variación consecuente en los niveles de radiación registrados para el total de las fachadas y tejados.

En cuanto a tendencias generales, las principales características encontradas en los resultados de la Zona 1A son:

- En el caso de la radiación solar total, se mantiene el verano como la época con mayor potencial de radiación solar, seguido por el invierno, primavera y otoño. Con respecto a la Zona 1, el invierno asciende al segundo lugar en potencial, mientras que la primavera desciende al tercer período en potencial disponible. El otoño es la época del año con menor potencial para ambas Zonas.
- Los niveles registrados de radiación solar directa conservan la tendencia para ambas zonas, de allí que los períodos con mayor potencial en orden decreciente son verano, primavera, invierno, y otoño.
- Finalmente para el caso de la radiación solar difusa, mantiene la tendencia y el potencial solar en el siguiente orden: verano, invierno, primavera y otoño.

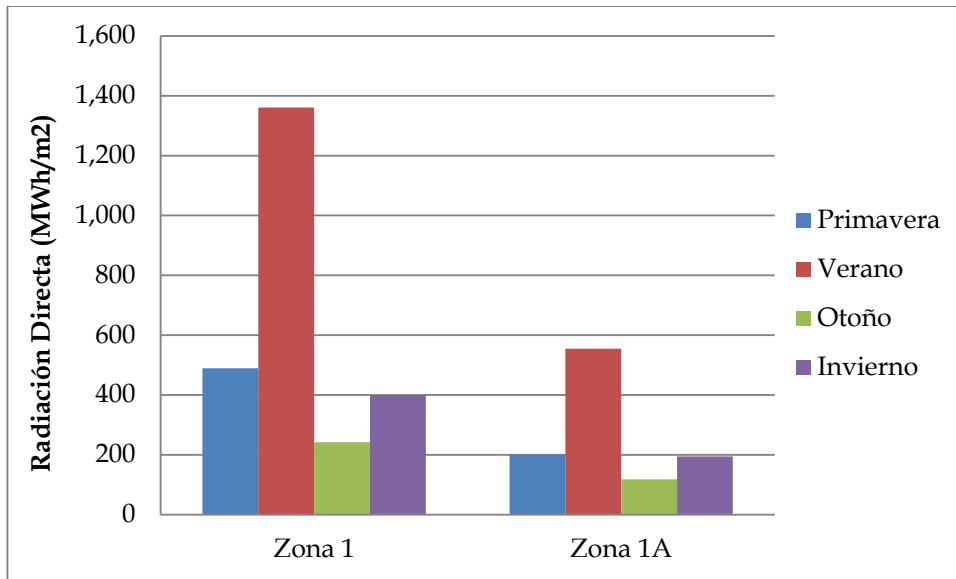


Figura 35 - Comparación de la radiación solar directa entre Zona 1 y Zona 1A

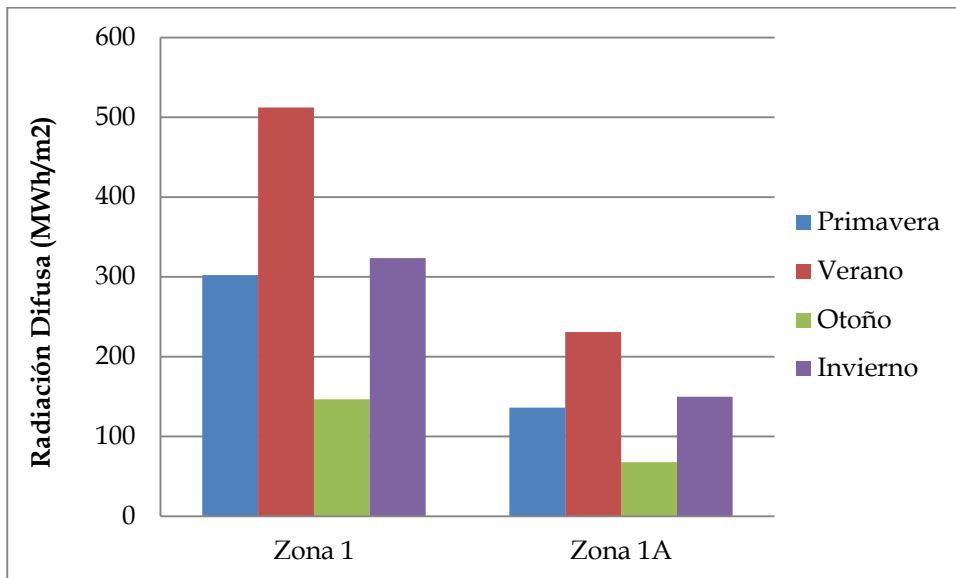


Figura 36 - Comparación de la radiación solar difusa entre Zona 1 y Zona 1<sup>a</sup>

El modelo tridimensional de la radiación solar total obtenida para la Zona 1A en diferentes épocas del año se ilustran en la Figura 37 (primavera), Figura 38 (verano), Figura 39 (otoño) y Figura 40 (invierno). Gráficamente al generalizar el modelo, se obtiene una definición más “limpia” de los tejados, al no trazar demasiados segmentos lineales que en un momento dado tienden a saturar la escena, como ocurre por ejemplo en la Figura 19.



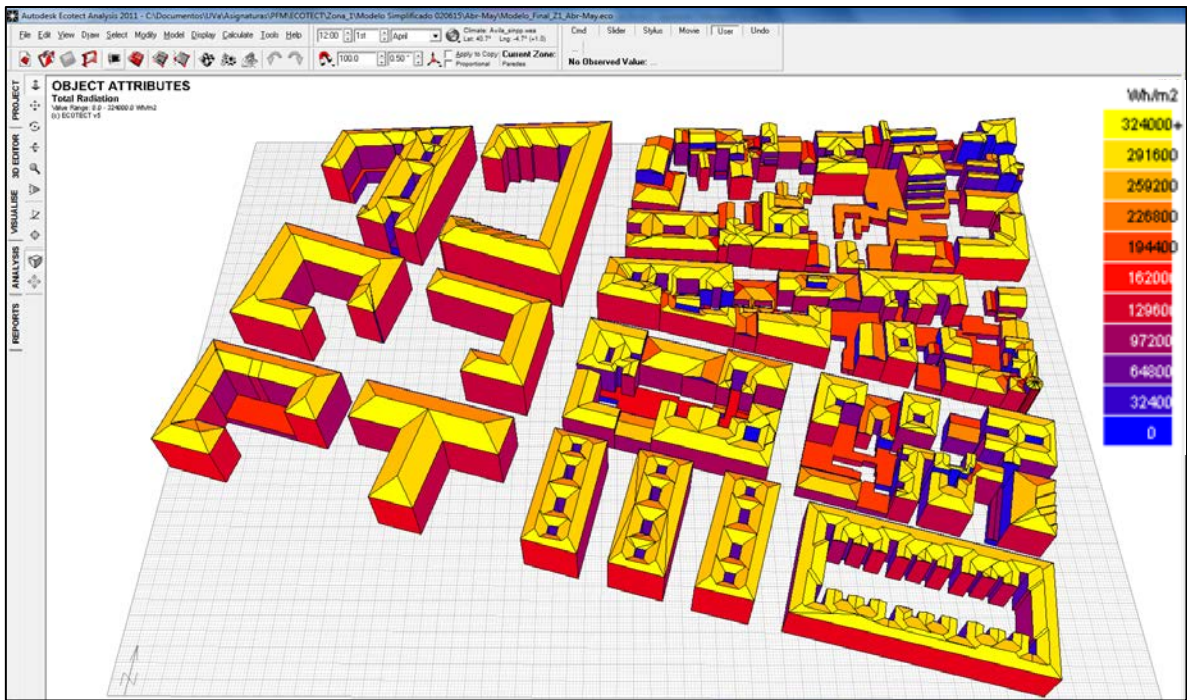


Figura 37 - Radiación Total calculada para primavera en la Zona 1A

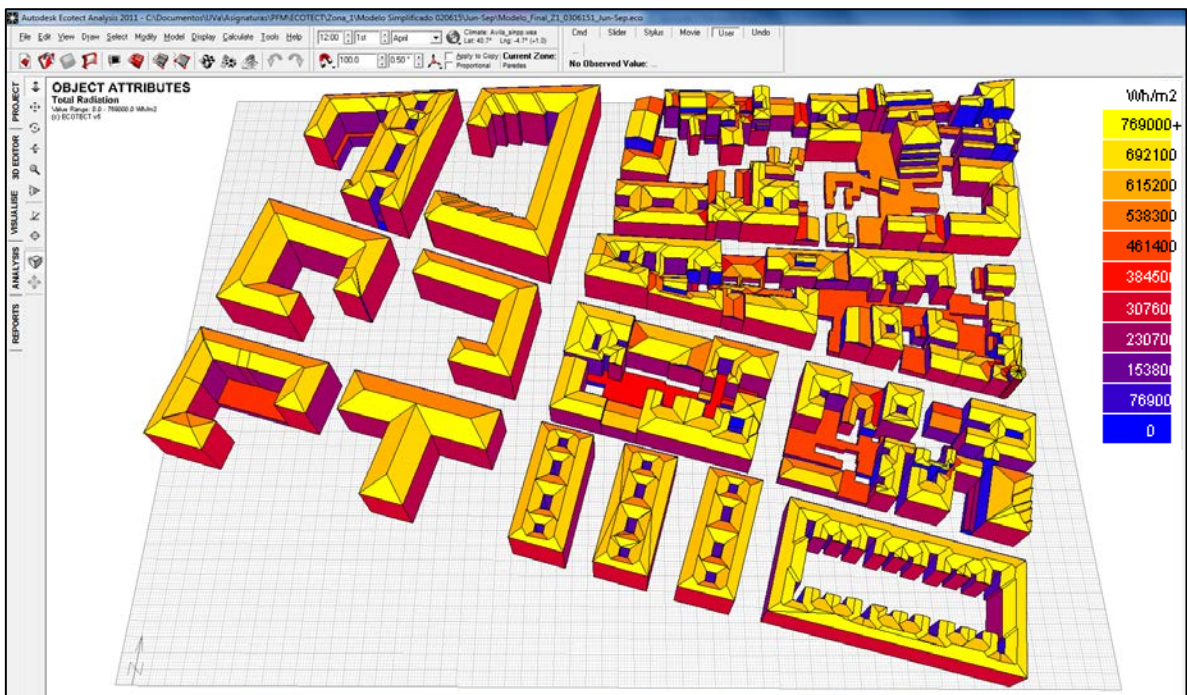


Figura 38 - Radiación Total calculada para verano en la Zona 1A

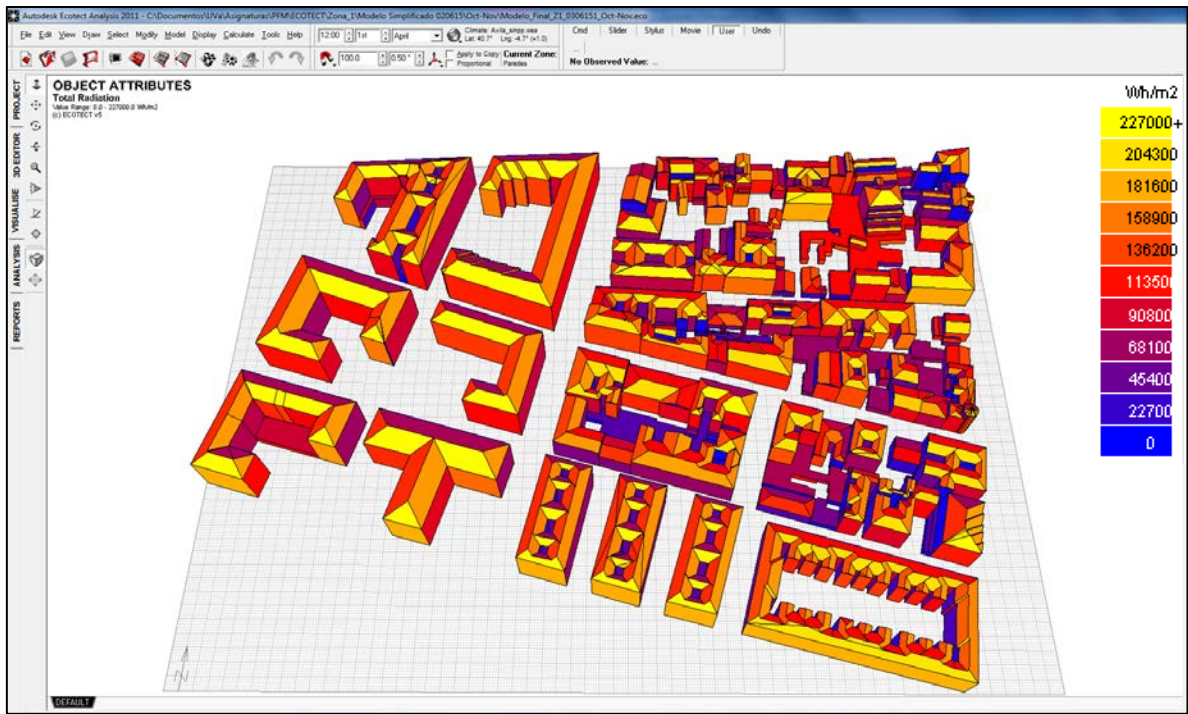


Figura 39 - Radiación Total calculada para otoño en la Zona 1A

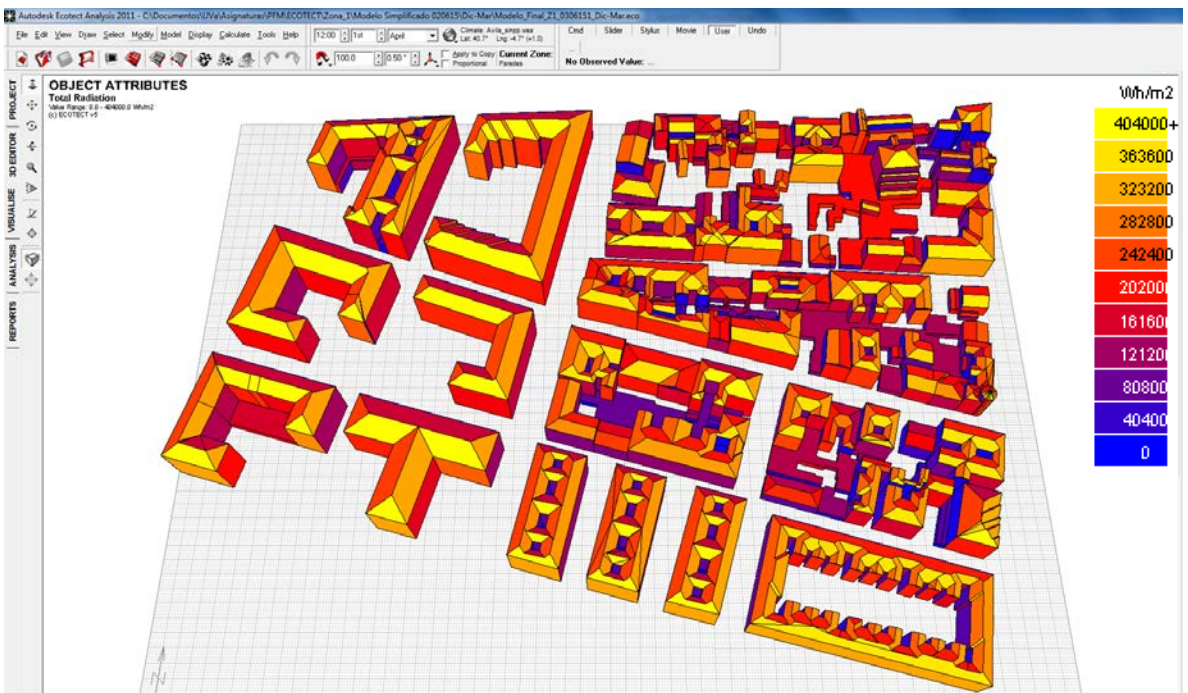


Figura 40 - Radiación Total calculada para invierno en la Zona 1A

## 6.2 Proyección de Sombras para las zonas de estudio

Con el fin de establecer el comportamiento de las sombras y su proyección sobre el modelo de cada una de las zonas, se hace necesario definir un día y hora específica. De acuerdo a los resultados de mayor potencial de radiación solar, que fueron obtenidos para los meses comprendidos entre Junio y Septiembre, se simularon las sombras para cada zona de estudio durante las horas con potencial solar del día 15 de Julio, comprendido entre las 09:00 y 17:00, con un intervalo de 30 minutos entre cada representación de sombra.

Los resultados obtenidos para cada zona de estudio, se ilustra en las Figuras Figura 41 - Figura 44. Claramente se identifica la directa proporcionalidad entre la densidad urbana, la altura de las edificaciones, y la conformación de zonas con mayor susceptibilidad a encontrarse cubiertas por sombras a lo largo de la jornada de captura de radiación solar. De esta manera se explica el que la Zona 3 alcance los mayores niveles de radiación solar total para casi todas las estaciones del año (i.e. a excepción de otoño), principalmente por la influencia de la distribución de sombras e inclinación de tejados favorables. Este último comportamiento poco afecta las edificaciones allí existentes, al encontrarse aisladas cada una entre sí a una distancia óptima, de tal manera que a lo largo del año pueden aprovechar óptimamente la radiación solar tanto a nivel de tejados como fachadas.

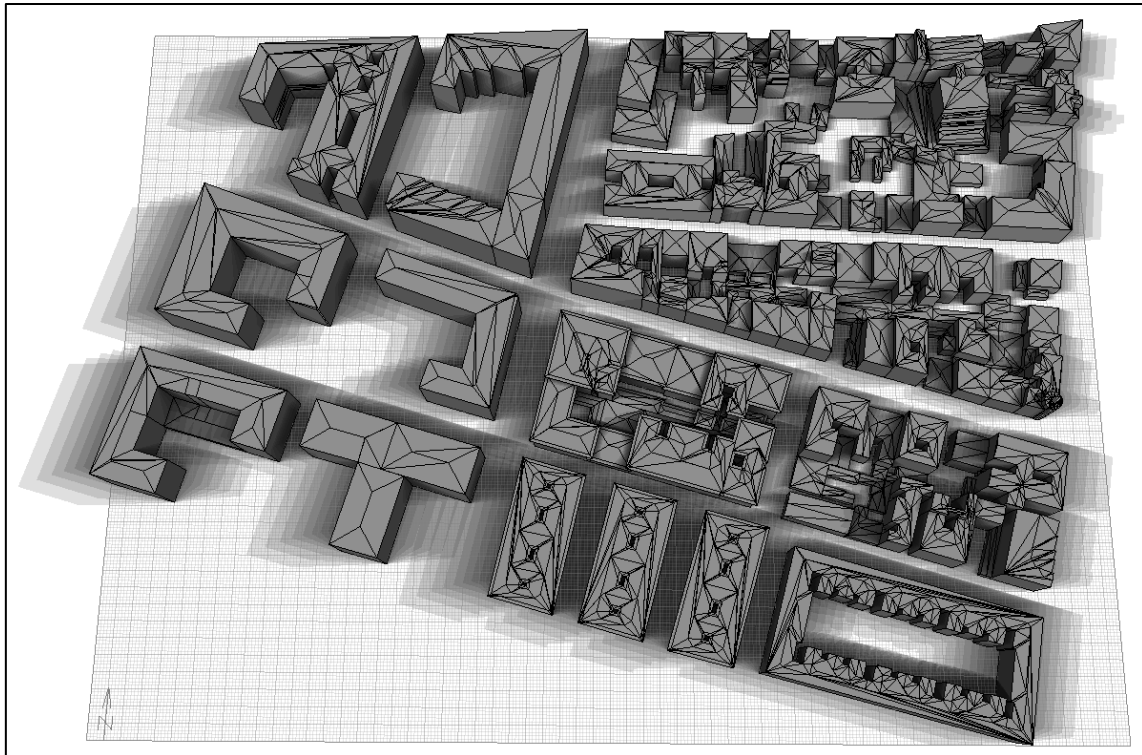


Figura 41 - Proyección de sombras en la Zona 1 entre las 09:00 - 17:00 en Julio 15

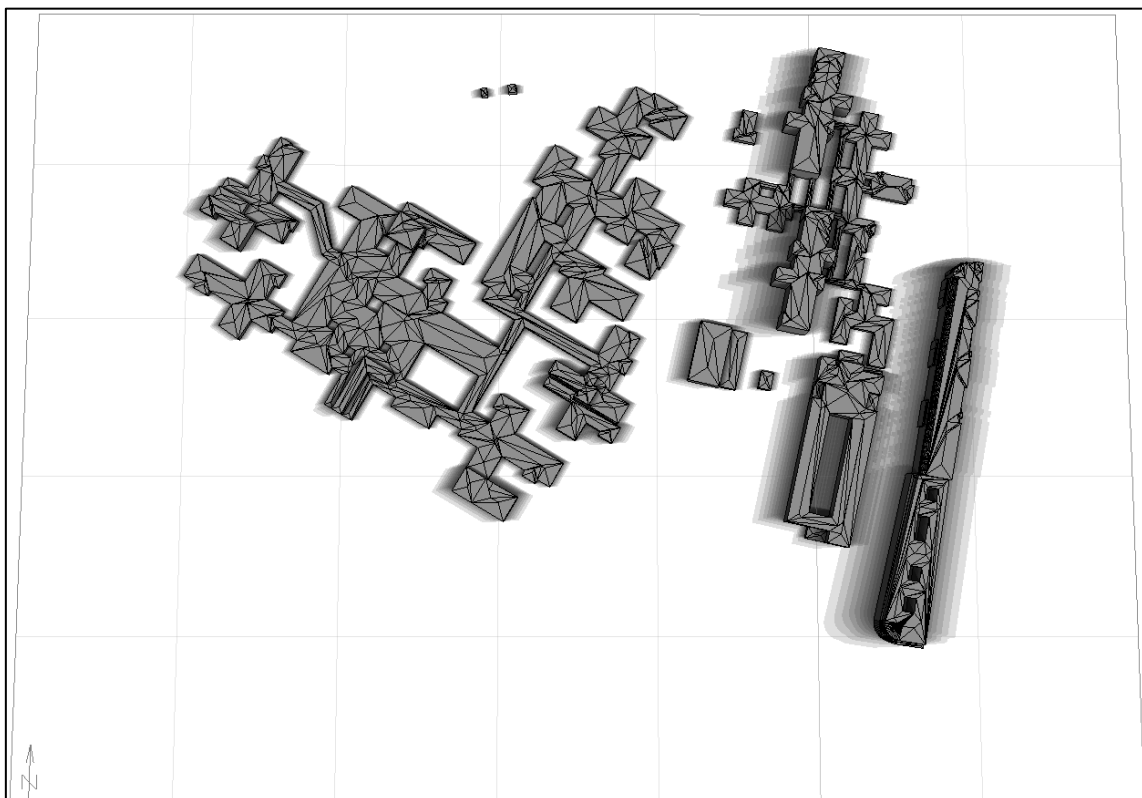


Figura 42 - Proyección de sombras en la Zona 2 entre las 09:00 - 17:00 en Julio 15

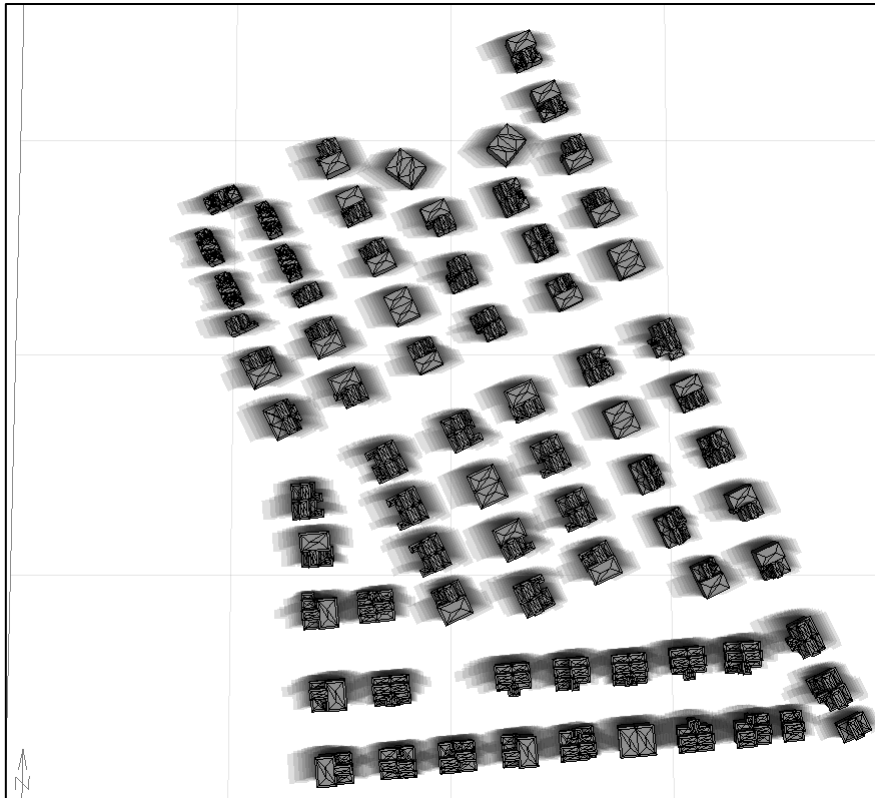


Figura 43 - Proyección de sombras en la Zona 3 entre las 09:00 - 17:00 en Julio 15

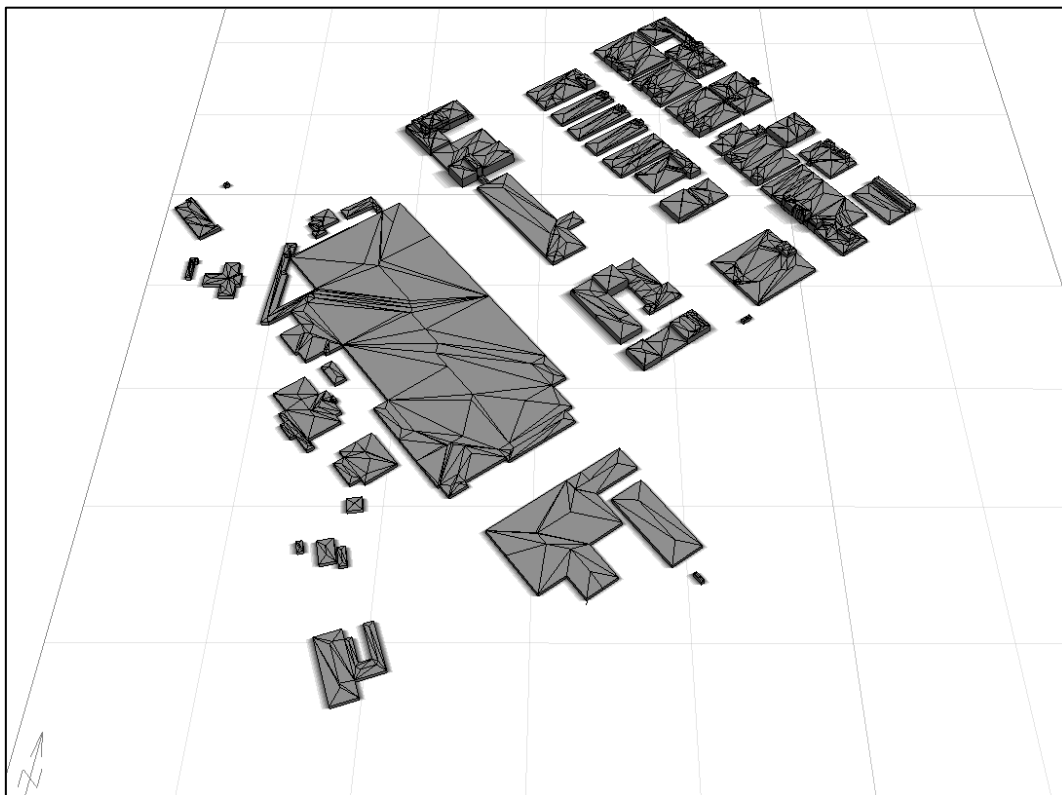


Figura 44 - Proyección de sombras en la Zona 4 entre las 09:00 - 17:00 en Julio 15

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El aprovechamiento del potencial de la radiación solar para la generación de energía eléctrica ha tomado impulso gracias a un marco normativo vigente, como por ejemplo el Protocolo de Kyoto, el objetivo 20-20-20, y las Directivas Europeas de Desempeño Energético. Cada una de estas directrices está encaminada en desarrollar las energías alternativas como un mecanismo de desarrollo limpio, que permita la independencia energética de las fuentes fósiles, con el fin de garantizar la sostenibilidad de los centros urbanos y sus habitantes. Con esto se busca realizar las adecuaciones necesarias a pequeña y gran escala, donde las edificaciones de los centros urbanos pueden brindar el empuje necesario al hacer viables iniciativas de generación y aprovechamiento energético, aprovechando infraestructura existente, así como acogiendo el diseño energético eficiente dentro del lineamiento que rigen el desarrollo futuro de todas las edificaciones. Al ser los centros urbanos los núcleos de demanda energética, se hace necesario reducir costos provenientes de las fuentes tradicionales de energía, y una de estas formas es conociendo el potencial de aprovechamiento de la radiación solar para cierta zona, de acuerdo con el estudio de la misma, sobre las fachadas y techos de las edificaciones.

Es en este punto, donde a partir de la revisión bibliográfica de estudios relacionados en el tema, se encontró que gran parte de las herramientas desarrolladas en la actualidad para entornos GIS, únicamente se centran en evaluar el potencial solar para entornos bidimensionales (e.g. techos, extensiones de tierra de mediano y gran tamaño a escala regional), esto es debido a la complejidad de las consideraciones requeridas, asociadas no sólo a la posición geográfica de los objetos (i.e. escala espacial), sino también la época del año para la cual se está evaluando la zona (i.e. escala temporal).

Por otro lado el reciente desarrollo de algoritmos implementados en entornos computacionales que faciliten el cálculo de la radiación solar en ambientes tridimensionales, donde se pueda interactuar en tiempo real con los datos, complica el desarrollo de los modelos de estudio empleando únicamente una herramienta GIS. Aunque existen algoritmos para calcular la radiación solar en escenarios tridimensionales, aún se encuentran en desarrollo y son de difícil acceso para poder implementarlas. Es claro que los Sistemas de Información Geográfica son

muy útiles en la gestión y consulta de la información a nivel regional o local, pero al momento de requerir especificidades a nivel por ejemplo de una fachada, se debe transferir la información base desde un GIS, para que sea un Software tipo CAD como Autodesk Ecotect el que realice los cálculos pertinentes a nivel del detalle requerido. No obstante, aunque la información catastral es vital para alimentar el sistema de datos, partiendo de los atributos que definen la morfología urbana, se hace necesario un software que sirva de intermediario, o como punto de transición.

De esta manera ESRI CityEngine brinda las suficientes herramientas para acoger los datos bidimensionales de las zonas a evaluar, y a través de unas reglas de modelamiento predefinidas, construye un modelo 3D de la zona de estudio, centrándose principalmente en representar las fachadas y los tejados. Es claro que para este estudio, se asumió que toda la fachada es aprovechable desde el punto de vista del diseño de los sistemas fotovoltaicos, sin embargo para que esto sea posible, se requerirán de las respectivas adecuaciones a nivel estructural y en conformidad con los diseños propios de los sistema de aprovechamiento, que no son objeto de estudio para este caso en particular.

Una vez se cuenta con el modelo tridimensional de la zona de interés, Autodesk Ecotect resultó ser una herramienta útil en el cálculo, despliegue, consulta y generación de reportes de los datos de radiación total, directa, difusa, así como en la representación de sombras para un período de horas definido, o una hora en particular si así se quisiera. Para este estudio, se ha escogido el día 15 de Julio, como el referente para la generación de las sombras, por cuanto pertenece al mes del año con mayor potencial de radiación solar total para todas las zonas de estudio. De esta manera se pudo verificar que zonas con mayor densidad de construcciones y altura edificada, son más susceptible a tener pérdidas de radiación por la eventual proyección de sombras de elementos cercanos. Así, fue la Zona 3, que mejor aprovechaba la radiación solar, al contar con construcciones lo suficientemente separadas para evitar que su área construida (e.g. fachadas y tejados) fuera alcanzada por sombras.

Los mayores niveles de radiación solar total se obtuvieron durante la época de verano en todas las zonas de estudio, tanto para tejados como fachadas. La Zona 3 alcanza el mayor potencial de aprovechamiento de energía solar (2,237 MWh/m<sup>2</sup>). Por otro lado la zona con menor potencial de radiación solar total es la Zona 4 (1,380 MWh/m<sup>2</sup>).

Con respecto a la época de invierno (Diciembre-Marzo), el máximo valor de radiación solar total obtenido en la Zona 3 alcanza los 937 MWh/m<sup>2</sup>, y el menor valor lo obtiene la Zona 2 (596 MWh/m<sup>2</sup>). A su vez, durante la primavera (Abril - Mayo) vuelve a ser la Zona 3 la que alcanza el mayor nivel de radiación solar total (950 MWh/m<sup>2</sup>), y el menor registro de radiación solar total lo obtiene la Zona 4 (586 MWh/m<sup>2</sup>).

Finalmente en Otoño (Octubre - Noviembre), el mayor potencial de radiación solar total se encuentra en la Zona 2 (533 MWh/m<sup>2</sup>), y es la Zona 4 aquella con la menor cantidad de radiación solar total disponible (332 MWh/m<sup>2</sup>).

En cuanto a la radiación solar directa se observa claramente como aporta mayor cantidad de energía en comparación con la radiación difusa; de allí que se exista un comportamiento similar de la tendencia de los datos con respecto a la radiación total. Para el caso de la radiación solar difusa, sigue destacándose la Zona 3 como la de mayor potencial de generación de energía para casi todas las épocas del año, no obstante los márgenes de diferencia en la cantidad de radiación difusa disponible entre las zonas es menor con respecto a la directa.

En conclusión, conforme a los valores de radiación solar total calculada para tejados y fachadas, se pudo establecer que la Zona 3 es la que cuenta con mayor potencial de aprovechamiento de la energía solar, seguida por la Zona 1, Zona 2 y Zona 4. Se verificó como a mayor área disponible para la captura de la energía solar, mayor potencial de radiación existe en la zona; sin embargo es claro como la Zona 4, a pesar de contar con la mayor área disponible (22 ha) no es lo suficiente para conseguir el mismo potencial de las zonas con menor área. Esto puede explicarse por el ángulo de inclinación de los tejados, que para esta zona se definió uniformemente como de 18°, y el cual puede no ser óptimo para la captura de los rayos solares durante todo el año.



La generalización de los segmentos que conforman cada uno de los planos de la huella de las edificaciones disponibles en Catastro, resultan ser una estrategia útil en la depuración del modelo, no solo en términos de visualización, sino también en los cálculos de la radiación solar total, directa y difusa al reducir el tiempo computacional de procesado. Luego de comparar los resultados de radiación solar obtenidos para la Zona 1 (original) y la Zona 1A (generalizada) se encontraron variaciones considerables en la magnitud de los mismos. No obstante lo anterior, la tendencia general se mantiene para los resultados de radiación directa y difusa, siendo la temporada con mayor potencial el verano, y la de menor el otoño. Así por ejemplo, para el caso del verano, se pasa de 1,873 MWh/m<sup>2</sup> en la Zona 1, a 785 MWh/m<sup>2</sup> en la Zona 1A. En esa medida, todas las épocas del año experimentan una decaída en los niveles de radiación, sin importar que sea de tipo directa o difusa.

Comparando los resultados obtenidos por Autodesk Ecotect, se encontró que como consecuencia de la generalización de los datos de Catastro, y por ende la reducción en el número de puntos que definen cada polígono de las edificaciones, se registró un decrecimiento del 6% del área total disponible, alcanzando un valor superior a más de 10,800 m<sup>2</sup>. Esto podría explicar la variación consecuente en los niveles de radiación registrados para el total de las fachadas y tejados. No obstante sería interesante para futuras investigaciones plantear una verificación en campo de los niveles de radiación que alcanzan los tejados y fachadas de una edificación, con el fin de validar la utilidad de la generalización de la información base, y cuantificar el grado de error que le transmite al modelo resultante.

Aunque actualmente se cuenta con diversas herramientas para la consulta de la radiación solar sobre áreas geográficas definidas puntualmente por el usuario, las cuales son de libre acceso e impulsadas por la Comunidad Europea (PVGIS), aún se hace necesario profundizar más en su aplicación para entornos tridimensionales, aprovechando herramientas de alta resolución como los láseres escáner. De esta manera se incrementa la robustez de los modelos de radiación solar, permitiendo definir claramente la viabilidad previa a inversiones en la adaptación de una fachada o tejado para la instalación de un sistema de aprovechamiento del recurso solar.

A su vez, el compendio de todos estos datos, se convierte en un insumo útil para la gestión del territorio, por parte de autoridades locales, así como en el trazado de políticas energéticas en el mediano y largo plazo. Es claro que este aspecto debe considerarse no sólo desde el punto de vista de potenciales energéticos, sino además cómo los futuros modelos de desarrollo urbanístico pueden propiciar un mejor aprovechamiento de la radiación solar, de tal forma que el diseño de los edificios aprovechen al máximo el área disponible, no sólo en términos espaciales, sino también a partir de las eventuales sombras que generará sobre otras edificaciones y que influye sobre el rendimiento energético del sistema, entendido como una red interconectada.

Es importante que las administraciones locales y nacionales se involucren de manera directa incentivando el aprovechamiento de los recursos energéticos propios de cada zona, optimizando y reduciendo costos de operación de redes, lo que permite hacer del mismo algo sostenible y viable a lo largo del tiempo, que puede ser escalable más allá del sector residencial, hacia el institucional o industrial. Para ello propiciar la consecución de herramientas de software con entornos operativos amigables al usuario, que aprovechen los bancos de datos meteorológicos recopilados durante decenios, para integrarlos a las nuevas tecnologías de captura de datos espaciales tridimensionales, y de esta manera delinear mejor las dinámicas particulares de cada zona. Con base en esto, los sistemas de información geográfica permitirán ayudar a definir el sistema que mejores resultados pueda brindar a su modelo de desarrollo.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Abdul-Rahman, A., & Pilouk, M. (2008). Spatial data modelling for 3D GIS., 302. Autodesk. (2010). *Ecotect analysis*.
- Azar, S. (2013). *TowmScope*
- Brito, M., Gomez, N., Santos, T., & Tenedório, J. (2012). Photovoltaic potential in a lisbon suburb using LiDAR data. *Sol Energy*, 86(1), 283-8.
- Carneiro, C., Morello, E., Desthieux, G., & Golay, F. (2010). Urban environment quality indicators: Application to solar radiation and morphological analysis on built area. *Advances in Visualization, Imaging and Simulation*, , 141-8.
- Catita, C., Redweik, P., Pereira, J., & Brito, M. (2014). Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades. *Comput Geosci*, 66, 1-12.
- Chimklai, P., Hagishima, A., & Tanimoto, J. (2004). A computer system to support albedo calculation in urban areas. *Build Environ*, 39(10), 1213-21.
- Compagnon, R. (2004). Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy Build*, 36(4), 321-8.
- De Filippis, A., & Scarano, G. (2010). The kyoto protocol and european energy policy. *European View*, 9(1), 39-46.
- del Río Gonzales, P., Hernández, F., & Gual, M. (2005). The implications of the kyoto project mechanisms for the deployment of renewable electricity in europe. *Energy Policy*, 33(15), 2010-2020.
- DGC. (2015). Consulta de cartografía, datos catastrales, y búsqueda de referencia catastral. dirección general de catastro. secretaria de estado de hacienda. Retrieved from <http://www.sedecatastro.gob.es/>
- Dubayah, R. (1992). Estimating net solar radiation using landsat thematic mapper and digital elevation data. *Water Resour Res*, 28(9), 2469-84.
- Dubayah, R., & Rich, P. (1995). Topographic solar radiation models for GIS. *Int J Geograph Inf Syst*, 9(4), 405-19.
- Directive 2009/28/EC of the european parliament and of the council of 23 april 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, (2009).

Erdély, R., Wang, Y., Guo, W., Hanna, E., & Colantuono, G. (2014). Three dimensional solar radiation model (SORAM) and its application to 3D urban planning. *Sol Energy*, 101, 63-73.

ESRI. (2012). ArcGIS resources: Tutorial 1, essential skills in CityEngine. Retrieved from <http://video.arcgis.com/watch/1767/tutorial-1-essential-skills>

Faessler, J. (2010). Evaluation du potentiel solaire en milieu urbain: Essais d'application aux toitures du canton de Genève.

Freitas, C., Catita, C., Redweik, P., & Brito, M. (2014). Modelling solar potential in the urban environment: State of the art review. *Elsevier*,

Fu, P., & Rich, P. (1999). Design and implementation of the solar analyst: An ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. *Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference*,

Goretzki, P. (2013). *GOSOL - Solarbüro für energieeffiziente Stadtplanung*

Hachem, C., Athienitis, A., & Fazio, P. (2011a). Design of solar optimized neighborhood. *ASHRAE 2011 Annual Conference, June 25-29th*,

Hachem, C., Athienitis, A., & Fazio, P. (2011b). Parametric investigation of geometric form effects on solar potential of housing units. *Solar Energy*,

Hay, J. (1979). Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces. *Sol Energy*, 23(4), 301-7.

Hetrick, W., Rich, P., & Parajka, J. (1993). Modeling insolation on complex surfaces. *Proceedings of the Thirteenth Annual ESRI User Conference*, 2, 447-58.

Hofierka, J. (1997). Direct solar radiation modelling within an open GIS environment. *Geogr. Inf. '97 from Res. to Appl. through Coop. Proceedings of JEC-GI'97 Conference in Vienna, Austria*, 1, 2, 575-584.

Hofierka, J., & Suri, M. (2002). The solar radiation model for open source GIS: Implementation and applications. *Open Source GIS - GRASS Users Conference*,

Hofierka, J., & Zlocha, M. (2012). A new 3D solar radiation model for 3D city models. *Trans GIS*, 16(5), 681-90.

Huld, T., Müller, R., & Gambardella, A. (2012). A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Sol Energy*, 86(6), 1803-15.

IGN. (2015). Plan nacional de ortofotografía aérea. Servicio de visualización WMS. Retrieved from <http://www.ign.es/wms-inspire/pnoa-ma?request=GetCapabilities&service=WMS>

Jakubiec, J., & Reinhart, C. (2013). A method for predicting city-wide electricity gains from photovoltaic panels based on LiDAR and GIS data combined with hourly daysim simulations. *Sol Energy*, 93, 127-43.

Jochem, A., Hofle, B., Rutzinger, M., & Pfeifer, N. (2009). Automatic roof plane detection and analysis in airborne lidar point clouds for solar potential assessment. *Sensor*, 9(7), 5241-62.

Kim, J. P. (2009). Land-use planning and the urban heat island effect dissertation city and regional planning.

Knowles, R. (1981). Sun rhythm form. *The MIT Press*,

Kumar, L., Hetrick, W., & Saving, S. (1997). Modeling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *Int J Geograph Inf Sci*, 11(5), 475-97.

La Genusa, M., Lascari, G., Rizzo, G., Scaccianoce, G., & Sorrentino, G. (2011). A model for predicting the potential diffusion of solar energy systems in complex urban environments. *Energy Policy*, 39, 5335-43.

Littlefair, P. (1998). Passive solar urban design: Ensuring the penetration of solar energy into the city. *Renew Sustain Energy Rev*, 2(3), 303-26.

Lobaccaro, G., & Frontini, F. (2014). Solar energy in urban environment: How urban densification affects existing buildings. *Elsevier*, , 1559-1569.

Mapdwell. (2015). Work with the sun. Retrieved from <https://www.mapdwell.com/es/company>

Mardaljevic, J. (2000). Simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance. *Light Res Technol*, 32(3), 111-8.

Marion, B., Anderberg, M., & George, R. (2001). PVWATTS version 2-enhanced spatial resolution for calculating grid-connected PV performance. *NCPV Program Review Meeting*, , 0-3.

Marszal, A., Heiselberg, P., Bourelle, J., Mussal, E., Voss, K., & Sartori, I. (2011). Zero energy building - a review of definitions and calculation methodologies. *Energy Build*, 43(4), 971.

Matzarakis, A., Rutz, F., & Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: Basics of the RayMan model. *Int J Biometeorol*, 54(2), 131-9.

Melo, E., Almeida, M., Zilles, R., & Grimori, J. (2013). Using a shading matrix to estimate the shading factor and the irradiation in a three-dimensional model of a receiving surface in an urban environment. *Sol Energy*, 92, 15-25.

Mendes, M. (2010). Localização e caracterização de locais com potencial para produção de energia solar-caso de estudo no nordeste de Portugal.

Miguet, F., & Groleau, D. (2001). Simulation tool including transmitted direct and diffuse light: Application to the evaluation of daylighting inside glazed intermediate spaces. *Proceedings of the 7th IBPSA*, , 907-14.

Naqi, M. (2006). Encyclopaedia of geomorphology.

Nouvel, R., Schulte, C., Eicker, U., Pietruschka, D., & Coors, V. (2013). CityGML-based 3D city model for energy diagnostics and urban energy policy support. *Proceedings of the 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 218-25.

Peckham, R. (1990). *Shadowpack - PC version 2-0 user's guide*

Pereira, F., Leder, S., Moraes, L., & Lenzi, C. (2009). Sky obstruction and daylight. *Proceedings of PLEA2009-26th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, , 22-4.

Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., & Steward, R. (1990). Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Sol Energy*, 44(5), 271-89.

Perez, R., Seals, R., & Michalsky, J. (1993). To all-weather model for sky luminance distribution-preliminary configuration and validation. *Sol Energy*, 51(5), 423.

Ratti, C., & Richens, P. (2004). Raster analysis of urban form. *Environ Plan B. Plan Des*, 31(2), 297-309.

Redweik, P., Catita, C., & Brito, M. (2011). 3D local scale solar radiation model based on urban LiDAR data. *Proceedings of ISPRS*.

Rigollier, C., Bauer, O., & Wald, L. (2000). On the clear sky model of the ESRA - European solar radiation atlas - with respect to the heliosat procedure for irradiance estimates from satellite images. *Sol Energy*, 68(1), 33-48.

Robinson, D., & Stone, A. (2004). Irradiation modelling made simple: The cumulative sky approach and its applications. *Proceedings of PLEA Conference*, , 19-22.

- Santos, T., Gomes, N., Freire, S., Brito, M., Santos, L., & Tenedório, J. (2014). Applications of solar mapping in the urban environment. *Applied Geography*, 51, 48-57.
- Skelion. (2013). *Skelion 5.0.7 user's guide*.
- Stemers, K. (2003). Energy and the city: Density, buildings and transport. *Energy and Buildings*, 35(1), 3-14.
- Šúri, M., Huld, T., & Dunlop, E. (2005). PV-GIS: A web-based solar radiation database for the calculation of PV potential in Europe. *Int J Sustain Energy*, 24(2), 55-67.
- Tadi, M., Lobaccaro, G., & Vahabzadeh, S. (2012). Sustainable urban morphology for a greener city: An integrated approach for the energy efficiency of neighbourhoods. *GreenAge Symposium*.
- Teller, J., & Azar, S. (2001). Townscope-II a computer system to support solar access decision making. *Sol Energy*, 70(3), 187-200.
- Tooke, T., Coops, N., Christen, A., Gurtuna, O., & Prévot, A. (2012). Integrated irradiance modelling in the urban environment based on remotely sensed data. *Sol Energy*, 86(10), 2923-34.
- Tregenza, P. (1987). Subdivision of the sky hemisphere for luminance measurements. *Light Res Technol*, 19(1), 13-1.
- United Nations. (1997). Kyoto protocol to the United Nations framework. *Convention on Climate Change*. Kyoto.
- USDE. (2015). EnergyPlus energy simulation software. U.S. department of energy. Retrieved from [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata\\_sources.cfm#SWEC](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_sources.cfm#SWEC)
- Viquier, L., Babiker, M. H., & Reilly, J. M. (2003). The costs of the Kyoto protocol in the European Union. *Energy Policy*, 31(5), 459-481.
- Wiginton, L., Nguyen, H., & Pearce, J. (2010). Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. *Comput Environ Urban Syst*, 34(4), 345-57.
- Wilson, J., & Gallant, J. (2000). Secondary topographic attributes. *Terrain Analysis. Principles and Applications*, , 87-132.

