

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**ESTIMACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL EN LAS  
ENVOLVENTES DE UN EDIFICIO ESTÁNDAR EN LA CIUDAD DE  
SANTIAGO, REGIÓN METROPOLITANA, MEDIANTE UN MODELO DE  
SIMULACIÓN.**

**ESTEBAN ADOLFO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ**

**SANTIAGO, CHILE.  
2011**

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**ESTIMACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL EN LAS  
ENVOLVENTES DE UN EDIFICIO ESTÁNDAR EN LA CIUDAD DE  
SANTIAGO, REGIÓN METROPOLITANA, MEDIANTE UN MODELO DE  
SIMULACIÓN.**

**ESTIMATION OF GLOBAL SOLAR IRRADIANCE IN THE ENCLOSURES  
OF A STANDARD BUILDING IN THE CITY OF SANTIAGO,  
METROPOLITAN REGION, THROUGH A SIMULATION MODEL.**

**ESTEBAN ADOLFO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ**

**SANTIAGO, CHILE.  
2011**

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**ESTIMACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL EN LAS  
ENVOLVENTES DE UN EDIFICIO ESTÁNDAR EN LA CIUDAD DE  
SANTIAGO, REGIÓN METROPOLITANA, MEDIANTE UN MODELO DE  
SIMULACIÓN.**

Memoria para optar al título profesional de:  
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

**ESTEBAN ADOLFO GONZÁLEZ RODRÍGUEZ**

<b>Profesores Guía</b>	<b>Calificaciones</b>
Sr. Luis Morales S. Profesor de Ciencias Físicas y Naturales, Dr.	6,2
Sra. Luz Alicia Cárdenas-Jirón Profesora de Urbanismo, Dra.	5,5
<b>Profesores Evaluadores</b>	
Sr. Manuel Paneque C. Bioquímico, Dr.	6,5
Sra. Maruja Cortés B. Ingeniero Agrónomo, M. Sc.	6,2

Santiago, Chile.  
2011

# Índice

Resumen .....	5
Abstract.....	6
Introducción.....	7
Objetivos.....	9
Objetivo general. ....	9
Objetivos específicos.....	9
Materiales y Métodos .....	10
Área de estudio .....	10
Modelación de la Radiación Solar Global.....	11
Relaciones astronómicas entre el Sol y la Tierra.....	11
Cálculo de irradiancia.....	15
Cálculo de interrupciones de la irradiancia sobre una superficie.....	20
Modelo Ecotect.....	29
Datos de entrada.....	29
Cálculo de irradiancia.....	29
Cálculo de interrupciones.....	30
Resultados y Discusión.....	34
Calibración del modelo Pinsol para la ciudad de Santiago, RM.....	34
Comparación de los resultados de los modelos.....	36
Conclusiones.....	42
Bibliografía.....	43
Anexo .....	46
Cálculo de SVF.....	46

## Resumen

El estudio del recurso solar disponible en fachadas de edificios puede permitir el desarrollo de proyectos para su aprovechamiento, sin embargo, en Chile actualmente no se dispone de datos en forma de valores medidos por instrumentos para ello. Para subsanar esta deficiencia, se utilizan modelos que simulan los procesos físicos durante la trayectoria de la energía solar, considerando los efectos específicos asociados al entorno del lugar. Por esto, se propuso estimar la irradiancia solar global en las fachadas de un edificio estándar en la ciudad de Santiago, Región Metropolitana, mediante un modelo de simulación. Para lograr dicho objetivo, se modificó el modelo PINSOL para realizar estimaciones en entornos urbanos mediante la inclusión del factor de cielo visible (SVF), y se evaluó la exactitud del cálculo mediante una comparación con el modelo comercial Autodesk® Ecotect sobre las fachadas de la biblioteca Ruy Barbosa, de la facultad de Ciencias Agronómicas en el Campus Antumapu de la Universidad de Chile.

De los resultados obtenidos, PINSOL tiene mejores ajustes en las envolventes Techo y Este; en la fachada Oeste es poco satisfactorio, y Norte no tiene ninguna relación con Ecotect, debido al comportamiento errático de la serie de datos. A pesar de esto, en ambas simulaciones se observa una dinámica inversa de ésta fachada respecto de las otras: aumenta la irradiancia en invierno y disminuye en verano, de tal forma que, en la época invernal, la captación sería más eficiente en un plano con exposición norte y alta pendiente, siendo éste un dato relevante al momento del uso del recurso solar.

Pese a obtener resultados poco satisfactorios, las simulaciones representan a grandes rasgos las características del recurso solar en fachadas de edificios en la Región Metropolitana. Sin embargo, la falta de información adecuada como entrada para los modelos y la escasez de datos con los cuales comparar los resultados impide comprobar de forma completa la validez de la modelación. A pesar de esto, este estudio permite contar con una primera aproximación del recurso disponible en el entorno urbano de la región.

Los modelos de simulación de energía solar utilizados se mostraron como herramientas útiles para su prospección, pero al igual que otros tipos de modelos, se ven limitados por la calidad de los datos de entrada.

Palabras Clave: Irradiancia Solar, PINSOL, ECOTECT, Recurso Solar, Sky View Factor, Región Metropolitana.

## **Abstract**

The study of the available solar resource on building facades allows projects development for its use, however, currently there are no data as values measured by instruments for it. Instead, models that simulate physical processes in the path of solar energy are used, for which existing meteorological data is interpolated and adjusted to the specific effects associated with the local environment. Therefore, it was proposed to estimate the global solar irradiance on the facades of a standard building in the city of Santiago, Metropolitan Region, through a simulation model.

PINSOL model was modified to estimate solar irradiance in urban environments by including the Sky View Factor (SVF), and the accuracy of the calculation was assessed by comparison with the Autodesk ® Ecotect comercial model, on the facades of the Ruy Barbosa library.

PINSOL had better adjustments in the ceiling and East facade, in the West facade was unsatisfactory, and North had no relationship with Ecotect, due to the erratic behavior of the data series. Despite this, in both simulations, there is an inverse dynamics of this facade compared to the others: the irradiance increases in winter and decreases in summer, so that in the winter, collection would be more efficient in a plane with northern exposure and high slope, being this a relevant factor when the use of solar resources.

Despite the unsatisfactory results, the simulations represent roughly solar resource characteristics on facades of buildings in the metropolitan area. However, the lack of adequate information as input for the models and the paucity of data with which to compare the results impossible to verify in full the validity of the modeling. Despite this, this study allows for an approximation of the resource available in the urban environment in the region.

Simulation models are useful tools for solar energy prospecting, but like other types of models are constrained by the data, as explained above.

**Keywords:** Solar irradiance, PINSOL, ECOTECT, solar, Sky View Factor, Metropolitan Region.

## Introducción

La energía solar es renovable y limpia, y en los últimos años se ha convertido en la tecnología energética de más rápido crecimiento a nivel mundial: los paneles fotovoltaicos conectados a las redes de distribución presentaron un crecimiento anual del 50% en capacidad instalada acumulada tanto en el año 2008 como en 2009, alcanzando un estimado de 22 GigaWatts (GW). Por otra parte, los colectores solares proveen de agua caliente y calefacción a un creciente número de hogares en el mundo, alcanzando 180 GigaWatt Térmicos (GWth) (GTZ, 2010).

En Chile, existe escasa información oficial del uso de la tecnología solar. Al año 2008 se estimó que unos 8.000 m<sup>2</sup> de paneles fotovoltaicos han sido instalados bajo el esquema de electrificación rural<sup>1</sup> (casas, escuelas y hospitales) y para sistemas de telecomunicaciones (Angulo *et al*, 2008). La capacidad fotovoltaica de Chile, considerando las obras aprobadas o en calificación (sin incluir instalaciones domiciliarias), es un poco más de 100 MW<sup>2</sup>. Por su parte, la evolución de la superficie de colectores instalados en los últimos años es bastante significativa, llegándose a instalar unos 7.000 m<sup>2</sup> en 2008. De los diferentes sectores en los que tienen aplicación estos sistemas, es en el sector residencial donde existe una mayor concentración sistemas, representando un 33% del total. Las piscinas (20%), empresas e instituciones (20%) y el sector industrial (19%) son los sectores que siguen al sector residencial (Tech4CDM, 2009).

Por su localización geográfica, nuestro país posee condiciones muy favorables para el aprovechamiento de esta energía, pues cuenta con condiciones privilegiadas de radiación solar, como escasas regiones en el mundo: el 50% del territorio está en el llamado “cinturón solar de la tierra”, entre los 35° de latitud norte y los 35° de latitud sur, como se observa en la Figura 1; además, toda la zona norte y centro del país presenta los mayores niveles de irradiancia<sup>3</sup> a nivel mundial, sobre 200 Kcal cm<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup> en una superficie horizontal, características por las cuales se hace conveniente emplear su uso (Sarmiento, 2007). Se estima un potencial bruto de Energía Solar entre 40.000 y 100.000 MW en todo el territorio (UTFSM, 2008).

En la situación actual que afecta al país respecto de su seguridad energética, frente a la creciente incertidumbre de los recursos globales y la volatilidad que experimentan los precios de los combustibles fósiles, se vuelve necesaria la propuesta de alternativas de solución para la contingencia y el futuro desarrollo nacional (UTFSM, 2008; Angulo *et al*, 2008). La Comisión Nacional de Energía (CNE) en los documentos “Plan de Seguridad Energética” del año 2006, y “Política Energética: Nuevos Lineamientos” del 2009, declara la intención de asegurar el abastecimiento del país frente a problemas tales como la escasez del gas natural u otros combustibles fósiles, variabilidad del agua disponible en represas, entre otros. La propuesta en dichos escritos se centra en “diversificar la matriz energética” de modo que se promueva la Eficiencia Energética (EE), y por otra parte, ampliar la matriz energética al uso de Energías Renovables No Convencionales (ERNC), entre las cuales, la energía solar presenta una cantidad de beneficios y ventajas importante: sus características de inagotabilidad y abundancia pueden contribuir a los objetivos de seguridad de suministro y sustentabilidad ambiental

<sup>1</sup> Programa de Electrificación Rural: <http://www.subdere.gov.cl/1510/w3-propertyvalue-33038.html>.

<sup>2</sup> Disponibles en el Servicio de Evaluación Ambiental (<http://www.sea.gob.cl/>)

<sup>3</sup> Luz solar directa, difusa y reflejada que incide sobre una superficie; generalmente se expresa en W·m<sup>-2</sup>.

de las políticas energéticas. Por otro lado, el hecho de que sea una energía con una gran dispersión por la superficie e intermitente puede ser considerado tanto como ventaja (al abarcar mucho terreno, su aplicabilidad es extensa) y como desventaja (puede implicar, por ejemplo, la consideración de sistemas de acumulación) (Sarmiento, 2007).

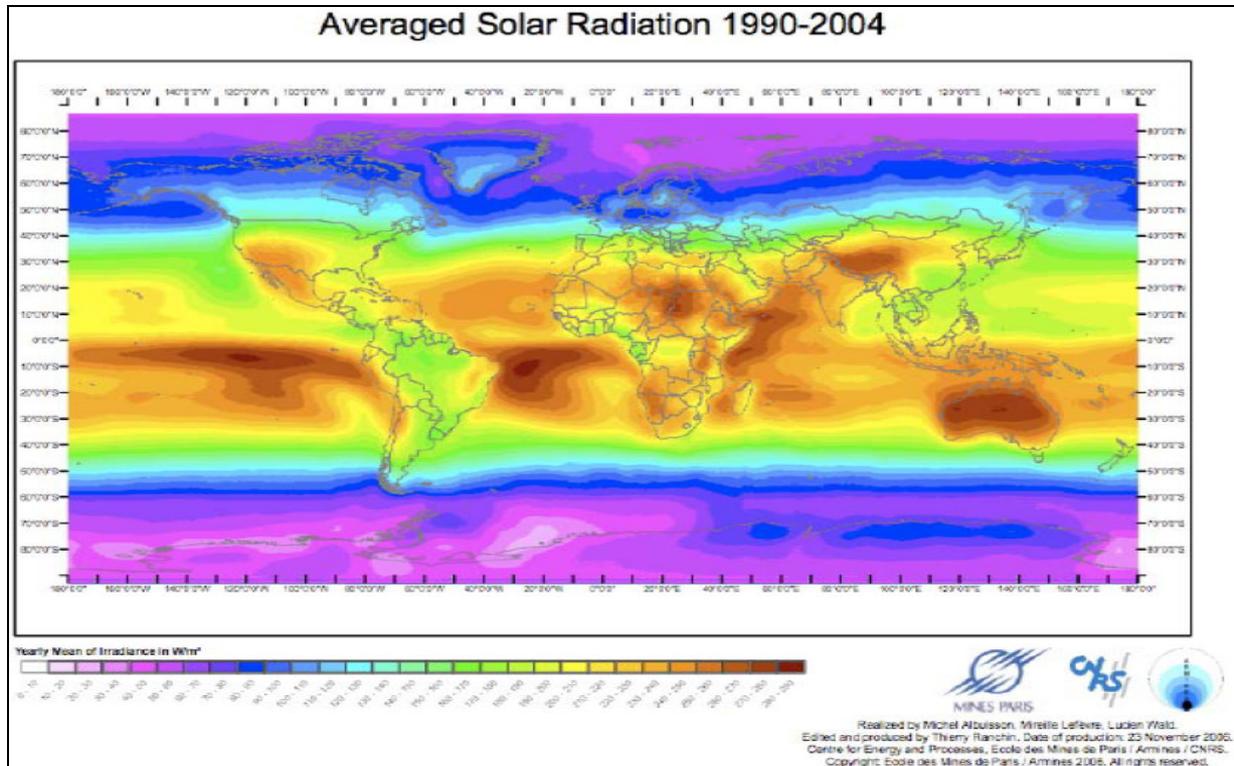


Figura 1. Promedio de radiación solar para el período 1990-2004. Fuente: NREL, 2005; citado por UTFSM, 2008

Las ciudades y sus edificaciones tienen un impacto significativo en el uso de la energía y el medio ambiente, pues cobijan prácticamente todos los aspectos del quehacer urbano: trabajo, vivienda, enseñanza, gobierno, atención médica, cultos, deporte, etc. (NREL, 2008). Los sectores Residencial, Comercial y Público consumieron el 33% del total de la energía generada en el año 2007 (GTZ, 2009). Por lo tanto, el fomentar el aprovechamiento extensivo de la radiación solar en ciudades se presenta como una estrategia viable para un desarrollo sustentable, pues puede constituir un aporte significativo a la reducción del consumo de las actuales fuentes energéticas fósiles, con la consiguiente disminución de las emisiones contaminantes (Compagnon, 2004). Este es el caso de países como España y Alemania, donde la normativa obliga a las construcciones nuevas o refaccionadas a instalar equipos solares, con lo que se estima un ahorro de energía entre un 30% y 40% para cada edificio y una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, causada por el consumo energético, de un 40% a un 55% (GTZ, 2010; Reuters, 2006). En este sentido, la cuantificación de la radiación solar incidente sobre edificaciones adquiere una gran importancia para el diseño adecuado de instalaciones de aprovechamiento de energía solar, de lo que deriva la conveniencia de disponer de valores de irradiación solar para la mayor cantidad de localidades, orientaciones e inclinaciones posibles. Sin embargo, en Chile, actualmente no se dispone de esta información en forma de valores medidos por instrumentos, dado que las escasas estaciones de monitoreo que registran radiación solar solamente presentan datos para superficies horizontales, los cuales son utilizados como parámetros para la estimación de irradiancia en planos inclinados (Sarmiento, 1995).

Para Chile, existen tablas genéricas de valores promedios anuales y mensuales de irradiancia solar global sobre las fachadas, desagregadas por orientación e inclinación a nivel de latitudes y localidades, los cuales se usan como referentes (CNE, 2008; Sarmiento, 2007; Cárdenas *et. al.*, 2006; Neila, 2004; Sarmiento, 1995.; Stuvén, 1968). No obstante, entre las consideraciones generales de algunas de estas publicaciones, se advierten porcentajes de error entre  $\pm 2\%$  anual y  $\pm 8\%$  en época estival, respecto de valores medidos instrumentalmente. Además, estos últimos al ser considerados correctos pueden incrementar el grado de error, pues pueden llegar a presentar errores de registro del orden de  $\pm 30\%$  (Sarmiento, 1995).

Para mejorar los cálculos y minimizar el error en la estimación del recurso solar<sup>4</sup> que puede implicar el uso de las tablas mencionadas anteriormente, es posible utilizar modelos que se basan en la simulación de los procesos físicos que ocurren durante la trayectoria de la energía solar. Estos modelos son parte de programas de simulación que facilitan la optimización de la energía y el desempeño medioambiental de edificios, los cuales presentan métodos cada vez más avanzados para el estudio de la penetración de la radiación solar en diferentes texturas urbanas: muestran cierto grado de madurez, sus mecanismos han sido extensivamente validados y su uso se está expandiendo tanto en ámbitos académicos como comerciales (Compagnon, 2004).

La utilización de estos modelos puede ser muy útil tanto para aspectos legislativos como para la actividad edilicia, si se pretende generar normas técnicas y/o emplear sistemas pasivos o activos de energía junto con aplicación de tecnologías limpias para promover ERNC y EE en el medio ambiente construido, convirtiéndose así en una opción en la búsqueda de diversificación de la matriz energética chilena, en el mediano y largo plazo. Es por esto que se proponen los siguientes objetivos:

## **Objetivos**

### ***Objetivo general.***

Estimar la irradiancia solar global en fachadas y techumbres de un edificio estándar<sup>5</sup> en la ciudad de Santiago, Región Metropolitana, mediante un modelo de simulación.

### ***Objetivos específicos.***

1. Calibrar el modelo PINSOL para la ciudad de Santiago, RM.
2. Comparar los resultados del modelo PINSOL modificado con un modelo comercial.

---

<sup>4</sup> Cantidad de insolación que recibe una zona, que generalmente se mide en  $\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$ .

<sup>5</sup> Se define "Edificio estándar" como una aproximación geométrica de una edificación en la ciudad de Santiago, por lo que sus parámetros son variables (tamaño y pendiente de sus fachadas, orientación respecto del norte, altura, etc.).

## Materiales y Métodos

### Área de estudio

El presente estudio comprende a la ciudad de Santiago, Región Metropolitana, ubicada aproximadamente entre las coordenadas 32°55'S y 34°17'S, 69°46'O y 71°42'O, abarcando un superficie de alrededor de 15.403,2 Km<sup>2</sup>, con una altitud promedio de 567 m.s.n.m. Presenta un clima templado cálido con lluvias invernales, conocido como clima mediterráneo continental. La ubicación de Santiago al interior de una cuenca es uno de los factores que genera un efecto predominante en el tipo de clima: predomina una estación seca prolongada de 7 a 8 meses, esto es porque las precipitaciones ocurren preferentemente en el invierno austral, específicamente entre mayo y agosto, donde precipita alrededor del 80% del valor anual. La continentalidad que muestra la Región provoca que la humedad relativa sea baja, ligeramente superior al 70% como promedio anual. La amplitud térmica anual es alta, observándose una diferencia entre el mes más cálido (Enero) y el más frío (Julio) del orden de 13°C. Además, la diferencia media entre las temperaturas máximas y mínimas diarias oscila entre los 14°C a 16°C (DMC, 2010)

Respecto de la radiación solar en el área de estudio, la estación meteorológica Quinta Normal registra una RSG de aproximadamente 1.370 [kWh· año<sup>-1</sup>], con una fluctuación durante el año entre 6,42 [kWh· m<sup>2</sup>· día<sup>-1</sup>] en los meses cálidos y 1,22 [kWh· m<sup>2</sup>· día<sup>-1</sup>] en los meses fríos (CNE, 2007). La Figura 2 presenta la radiación global horizontal para la zona central.

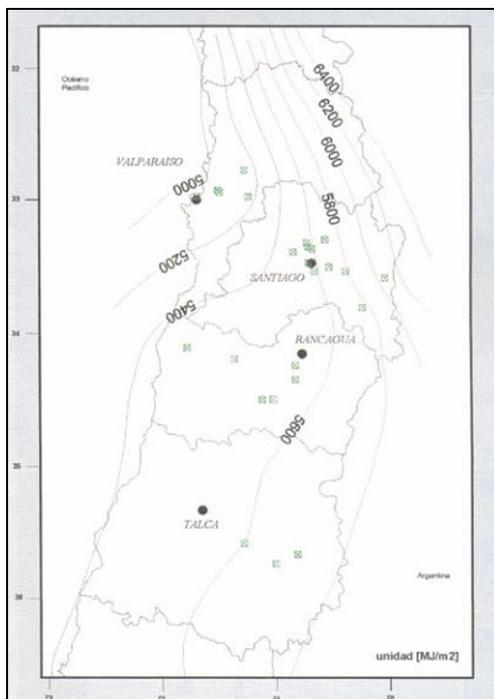


Figura 2. Mapa Irradiación Global Anual, en Plano Horizontal Zona Central (Regiones V – VII y Metropolitana, Chile), en MJ/m<sup>2</sup>. Fuente: Sarmiento, 1995.

## ***Modelación de la Radiación Solar Global***

### **Relaciones astronómicas entre el Sol y la Tierra.**

Las relaciones astronómicas que inciden en la estimación de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre son la distancia de la tierra al sol, la declinación solar y el tiempo solar (Iqbal, 1983).

1) Distancia de la tierra al sol: Esta varía a lo largo del año, debido a que la órbita alrededor del sol es elíptica, estando éste en uno de sus focos. Se mide en unidades astronómicas (Astronomical Units, AU), donde  $1 \text{ AU} = 1.4496 \cdot 10^8 \text{ Km}$ , siendo  $r_0$  la distancia mínima que corresponde a 0,983 AU. La radiación solar es inversamente proporcional al cuadrado de esta distancia, por lo que se desarrolló un factor de corrección de la órbita terrestre  $E_0$ , que corresponde al recíproco del radio vector de la tierra.

$$E_0 = (r_0/r)^2 = 1,000110 + 0,034221\cos(\Gamma) + 0,00128\text{sen}(\Gamma) + 0,000719\cos(2\Gamma) + 0,000077\text{sen}(2\Gamma) \quad \text{Ec.1}$$

Donde  $\Gamma$  es el día angular y corresponde a:

$$\Gamma = 2 \pi (dn - 1) / 365 \quad \text{Ec. 2}$$

con  $dn$  como el día del año.

2) Declinación solar: corresponde al ángulo formado por el plano elíptico de revolución de la tierra alrededor del sol y la línea que une el centro de cada uno de éstos. Este ángulo se forma debido a la inclinación de la tierra, entre la normal al plano elíptico y el eje polar, el cual varía para cada instante entre  $-23,5^\circ$  y  $+23,5^\circ$ , extremos que ocurren en el solsticio de verano e invierno en el hemisferio sur, respectivamente.

Su cálculo a nivel diario está dado por:

$$\delta \text{ (radianes)} = (0,006918 - 0,399912\cos(\Gamma) + 0,070257\text{sen}(\Gamma) - 0,006758\cos(2\Gamma) + 0,000907\text{sen}2\Gamma - 0,002697\cos(3\Gamma) + 0,00148\text{sen}(3\Gamma))(180/\pi) \quad \text{Ec.3}$$

donde  $\Gamma$  está dado por la ecuación 2.

3) Tiempo solar: La posición del Sol sobre el meridiano local va cambiando a lo largo del día y del año, por lo que si se fija la hora del reloj al mediodía cuando el Sol está sobre el meridiano local, luego de unos meses la posición del sol al mediodía del reloj estará ligeramente desfasada del meridiano local de referencia. La ecuación del tiempo  $E_t$  calcula esta diferencia en minutos, y corresponde a:

$$E_t = (0,000075 + 0,001868 \cos(\Gamma) - 0,032077 \sin(\Gamma) - 0,014615 \cos(2\Gamma) - 0,04089 \sin(2\Gamma))(229,18) \quad \text{Ec.4}$$

**Posición del sol relativa a superficies horizontales e inclinadas:**

Para calcular la radiación que llega sobre la superficie terrestre, se debe aplicar relaciones que son bien conocidas entre la posición del Sol en el cielo y la de la superficie en la Tierra.

1) Superficies horizontales: Para establecer la posición del Sol relativa a una superficie horizontal, se debe conocer las coordenadas de ésta en la Tierra (Figuras 3 y 4). Si se fija un punto correspondiente a un observador, es posible dibujar un plano circular que representa al plano de su posición, perteneciente a una esfera con el centro en la Tierra. La normal al plano del observador es el cenit que pasa a través del centro de la tierra. De esta manera, el ángulo cenital  $\theta_z$  corresponde al ángulo formado entre la línea que une el observador con el sol y el eje del cenit.

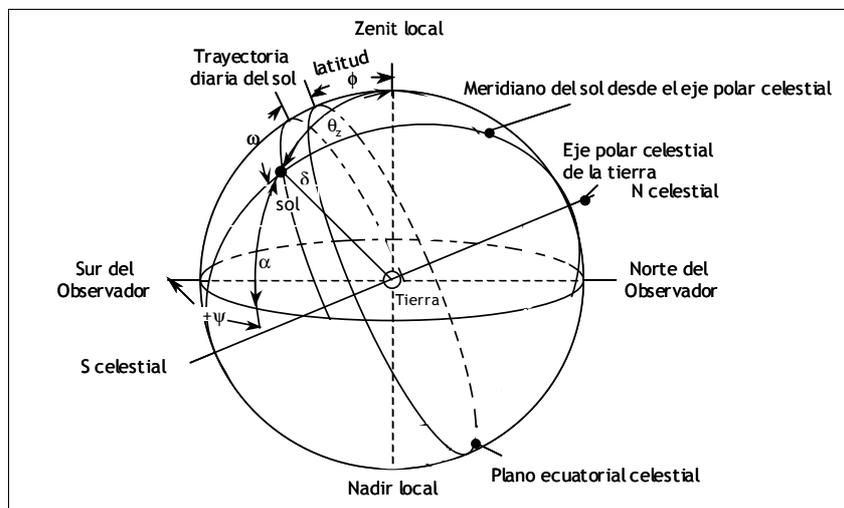


Figura 3. Posición del sol respecto a la esfera celeste de un observador en la tierra. Fuente: Urbina, 2003.

La altitud solar  $\alpha$  corresponde al ángulo de elevación del Sol, el cual se forma entre el plano del observador y la línea que lo une con el Sol, que es el complemento de  $\theta_z$ . El ángulo horario  $\omega$  es el ángulo medido desde el eje polar de la tierra entre el meridiano del observador y el meridiano solar. La latitud del plano circular corresponde a  $\phi$ . El azimut solar es el ángulo entre el meridiano del observador y el meridiano del sol, medido desde el cenit local.

En la Figura anterior, la relación trigonométrica entre centro del disco solar y la superficie horizontal corresponde a:

$$\cos(\theta_z) = \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\cos(\omega) = \text{sen}(\alpha) \quad \text{Ec.5}$$

$$\cos(\Psi) = \sin(\alpha)\sin(\phi) - \sin(\delta)/\cos(\alpha)\cos(\phi) \quad \text{Ec.6}$$

con:

$$\begin{aligned} 0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ, \cos(\psi) \geq 0 \\ 90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ, \cos(\psi) \leq 0 \end{aligned}$$

El ángulo a la salida del Sol  $\omega_s$  puede ser calculado para una superficie horizontal considerando el ángulo  $\theta_z=90^\circ$  y resulta de la ecuación 5:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan(\phi)\tan(\delta)) \quad \text{Ec. 7}$$

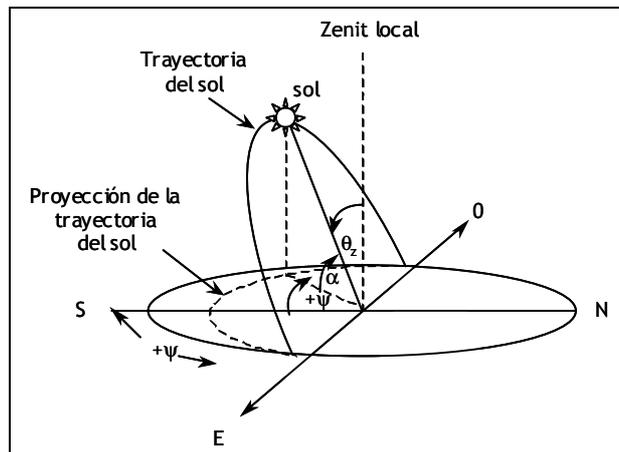


Figura 4. Posición del sol relativa a una superficie horizontal. Fuente: Urbina, 2003.

El ángulo horario a la puesta del Sol  $\omega_s$  es igual al de salida pero de distinto signo. A partir de lo anterior, el largo del día en horas es calculado como:

$$N_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan(\phi)\tan(\delta)) \quad \text{Ec.8}$$

2) Superficies inclinadas: para conocer la posición del Sol relativa a una superficie inclinada, es necesario conocer su pendiente con respecto al plano horizontal  $\beta$  y su orientación  $\gamma$ , que corresponde al ángulo entre la proyección de la normal a la superficie inclinada y el meridiano local. En este caso,  $\theta$  es el ángulo de incidencia, formado entre la normal a la superficie inclinada y el vector Tierra-Sol, como puede observarse en la Figura 5.

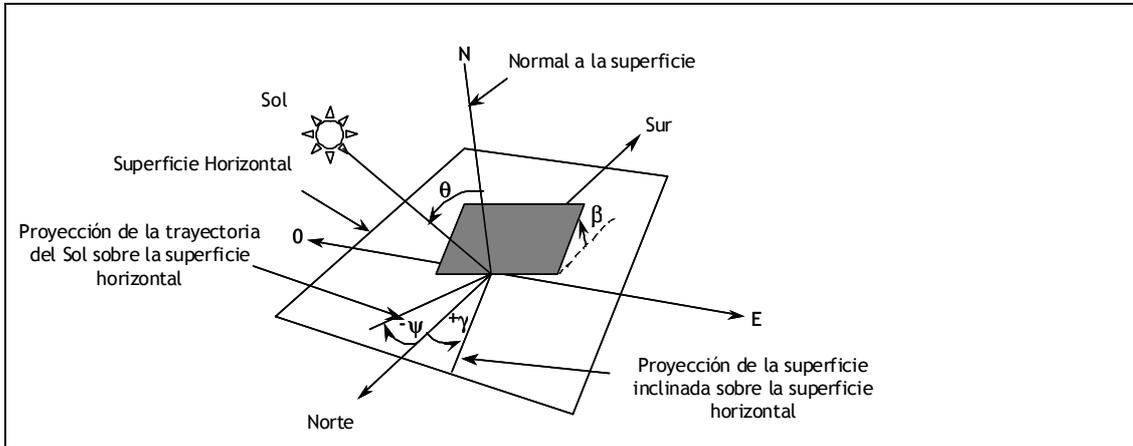


Figura 5. Posición del sol relativa a una superficie inclinada. Fuente: Urbina, 2003.

Para superficies que miran al ecuador, es decir  $\gamma = 0$ , la ecuación se reduce a:

$$\cos(\theta_0) = \sin(\delta) \sin(\phi - \beta) + \cos(\delta) \cos(\phi - \beta) \cos(\omega) \quad \text{Ec.9}$$

En este caso, el Sol sale cuando el ángulo de incidencia es de  $90^\circ$ . Por lo tanto, considerando  $\theta_0 = 90^\circ$  se obtiene el ángulo horario de salida del Sol  $\omega_s$  y se obtiene:

$$\cos(\omega_s) = -\sin(\delta) \sin(\phi - \beta) / (\cos(\delta) \cos(\phi - \beta)) \quad \text{Ec.10}$$

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan(\delta) \tan(\phi - \beta)] \quad \text{Ec.11}$$

Si el caso corresponde a una superficie orientada arbitrariamente con respecto al meridiano local, la relación trigonométrica está dada por:

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & (\sin(\varphi) \cos(\beta) - \cos(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma)) \sin(\delta) + (\cos(\varphi) \cos(\beta) \\ & + \sin(\varphi) \sin(\beta) \cos(\gamma)) \cos(\delta) \cos(\omega) \\ & + (\cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(\omega)) \end{aligned} \quad \text{Ec.12}$$

$$\cos(\theta) = \cos(\beta) \cos(\theta Z) + \sin(\beta) \sin(\theta Z) \cos(\psi - \gamma) \quad \text{Ec.13}$$

El periodo durante el cual el sol es visto por la superficie es  $\omega_{sr} - \omega_{ss}$ , ángulos que corresponden respectivamente a los de salida y puesta del sol.

## Cálculo de la irradiancia Solar.

Se le denomina Radiación Solar Extraterrestre (RSE) a la radiación solar que llega desde el sol a la tierra, que depende de la distribución espectral de la radiación extraterrestre. El valor de la RSE se obtiene integrando la irradiancia espectral bajo todas las longitudes de onda, por lo tanto, ésta corresponde a la constante solar  $I_{sc}$ . La constante solar se mide de forma normal a los rayos del sol y a una distancia de 1 AU desde éste.

Mediciones de la irradiancia espectral se han realizado desde mediados del siglo pasado. Frohlich y el World Radiometric Center (WRC) (1981; citado por Urbina, 2007) propusieron el valor de la constante solar de  $1.367 \text{ W m}^{-2}$ , la cual fue adoptada por la Comisión for Instrument and Methods of Observation (CIMO) y la World Meteorological Organization (WMO).

Se utiliza la ecuación para la RSE de acuerdo a la variación del día del año ( $d_n$ ):

$$\dot{I}_{scn} = \dot{I}_{sc} (1 + 0,034 \times \cos(d_n \times \pi / 182,621)) \quad \text{Ec.14}$$

donde  $I_{scn}$  es la RSE diaria,  $I_{sc}$  es la constante solar, y  $d_n$  es el día del año.

### RSE sobre una superficie horizontal

La radiación extraterrestre que llega sobre una superficie normal  $\dot{I}_{0n}$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) es:

$$\dot{I}_{0n} = \dot{I}_{scn} (r_0 / r)^2 = \dot{I}_{scn} E_0 \quad \text{Ec.15}$$

Sobre una superficie horizontal, la radiación  $\dot{I}_0$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) que incide en la superficie (Figura 6) depende del coseno del ángulo cenital  $\theta_z$ , que puede calcularse a partir de:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_{0n} \cos \theta_z = \dot{I}_{scn} E_0 (\sin(\delta) \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega)) \quad \text{Ec.16}$$

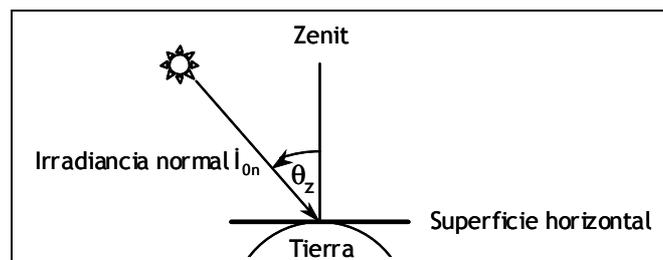


Figura 6. Ángulo de incidencia de la radiación extraterrestre normal.  
Fuente: Urbina, 2003.

Para un intervalo horario, el monto de la energía de la RSE que incide sobre el plano corresponde a la integral de la expresión anterior para un periodo de una hora, que en términos del ángulo horario medio, medido desde el mediodía solar y dentro del intervalo corresponde a:

$$I_0 = I_{sc_n} E_0 (\sin(\delta)\sin(\varphi) + (24/\pi)\sin(\pi/24)\cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\omega_i)) \quad \text{Ec.17}$$

Esta ecuación también puede escribirse en función del ángulo de puesta del sol  $\omega_s$ , entonces el coseno del ángulo cenital será:

$$\cos(\theta_z) = \cos(\delta)\cos(\varphi) \cdot (\cos \omega - \cos \omega_s) \quad \text{Ec.18}$$

y consecuentemente la ecuación 17 queda:

$$I_0 = I_{sc_n} E_0 \cos(\delta)\cos(\varphi) \cdot (\cos \omega_i - \cos \omega_s) \quad \text{Ec.19}$$

con  $(24/\pi)\sin(\pi/24) \approx 1$

La energía total diaria de la Radiación Solar es  $H_0$ , la que ocurre en el intervalo entre el ángulo de salida y de puesta de sol. Debido a que en una superficie horizontal  $\omega_{ss}$  es idéntico a  $\omega_{sr}$ , esta integral puede escribirse como:

$$H_0 = 2 \int_0^{ss} I_0 dt \quad \text{Ec.20}$$

Entonces:

$$H_0 = (24/\pi) I_{sc} E_0 [(\pi/180)(\sin(\delta)\sin(\varphi)) + (\cos(\delta)\cos(\varphi)\sin(\omega_s))] \quad \text{Ec.21}$$

## RSE sobre un plano inclinado

Sobre una superficie inclinada orientada hacia el norte, la radiación que llega sobre ella es (Figura 7):

$$I_{0\beta} = I_{scn} E_0 \cos(\theta_0) \quad \text{Ec.22}$$

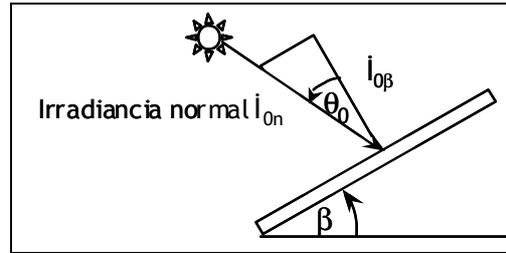


Figura 7. Angulo de incidencia de la radiación extraterrestre normal sobre una superficie inclinada.  
Fuente: Urbina, 2003.

Para un intervalo horario, la irradiancia total entre la hora angular  $\omega_1$  y  $\omega_2$  es:

$$I_{0\beta} = \frac{12}{\pi} I_{scn} E_0 \int_{\omega_1}^{\omega_2} [\sin(\delta) \sin(\varphi - \beta) + \cos(\delta) \cos(\varphi - \beta) \cos(\omega)] d\omega \quad \text{Ec.23}$$

Integrando resulta:

$$I_{0\beta} = I_{scn} E_0 [\sin(\delta) \sin(\varphi - \beta) + 0,9972 \cos(\delta) \cos(\varphi - \beta) \cos(\omega_i)] \quad \text{Ec.24}$$

donde el término 0,9972 puede aproximarse a la unidad.

La energía total diaria de la radiación solar sobre una superficie inclinada y orientada al norte  $H_{0\beta}$  resulta de la integración de  $I_{0\beta}$  entre los ángulos de salida y de puesta del sol:

$$H_{0\beta} = \frac{24}{\pi} I_{scn} E_0 \int_0^{\omega=\omega_s, \omega'_s} [\sin(\delta) \sin(\varphi - \beta) + \cos(\delta) \cos(\varphi - \beta) \cos(\omega)] d\omega \quad \text{Ec.25}$$

El límite de integración que se utiliza, es el mínimo de entre  $\omega_s$  y  $\omega'_s$ . Por lo tanto:

Si  $\omega_s \leq \omega'_s$ ,

$$H_{0\beta} = (24/\pi) I_{scn} E_0 [(\pi/180) \omega'_s \sin(\delta) \sin(\varphi - \beta) + \cos(\delta) \cos(\varphi - \beta) \sin(\omega'_s)] \quad \text{Ec.26}$$

Si  $\omega'_s \leq \omega_s$ ,

$$H_{0\beta} = (24/\pi) I_{scn} E_0 [(\pi/180) \omega_s \sin(\delta) \sin(\varphi - \beta) + \cos(\delta) \cos(\varphi - \beta) \sin(\omega_s)] \quad \text{Ec.27}$$

Para superficies orientadas en un ángulo  $\gamma$  la expresión para la energía total horaria de la Radiación Solar  $\dot{I}_{0\beta\gamma}$  es igual que para una superficie inclinada pero orientada al norte, donde el ángulo de incidencia es  $\theta$ :

$$\dot{I}_{0\beta\gamma} = I_{scn} E_0 \cos \theta \quad \text{Ec.28}$$

La irradiancia total horaria  $\dot{I}_{0\beta\gamma}$  entre las horas angulares  $\omega_1$  y  $\omega_2$  se escribe utilizando el mismo proceso de integración que para  $I_0$  e  $I_{0\beta}$ , resultando:

$$I_{0\beta\gamma} = I_{scn} E_0 \left[ \begin{array}{l} (\sin \varphi \cos \beta - \cos \varphi \sin \beta \cos \gamma) \sin \delta \\ + (\cos \varphi \cos \beta + \sin \varphi \sin \beta \cos \gamma) \cos \delta \cos \omega_i \\ + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega_i \end{array} \right] \quad \text{Ec.29}$$

donde  $\omega_i$  es la hora angular media del intervalo.

La irradiación diaria  $H_{0\beta\gamma}$  se obtiene de la misma forma que  $H_0$  y  $H_{0\beta}$ :

$$H_{0\beta\gamma} = \frac{12}{\pi} I_{scn} E_0 \int_{\omega_{sr}}^{\omega_{ss}} \cos(\theta) d\omega \quad \text{Ec.30}$$

## Radiación Global

Para estimar la radiación global se requiere conocer la radiación difusa y la directa, ya que sumándolas, se obtiene el monto de la radiación global que incide sobre la superficie. En el modelo Pinsol, la radiación solar directa media diaria se estima a partir de la ecuación 31:

$$H_b = a \cdot \tau \cdot H_{0\beta\gamma} \quad \text{Ec.31}$$

donde la transmisividad  $\tau$  de la atmósfera se calcula en función del Coeficiente de Transparencia  $K$  y el espesor relativo de la masa atmosférica  $m$  de todos los componentes de la atmósfera (moléculas de aire, vapor de agua y aerosoles) que atraviesa el flujo de radiación directa antes de llegar a la superficie de la tierra, como sigue:

$$\tau = K^m \quad \text{Ec.32}$$

La masa óptica relativa, de acuerdo con Iqbal (1983) y corregida por la relación de presión  $pp_0$  para una altitud  $z$  sobre el nivel del mar es:

$$m = pp_0 / \cos \theta \quad \text{Ec.33}$$

A partir de la ecuación que relaciona  $p$  con la altitud  $z$  de la superficie y la presión a nivel del mar se obtiene  $p/p_0$

$$p/p_0 = \exp(-0,000118 \cdot z) \quad \text{Ec.34}$$

En cuanto a la radiación total difusa, ésta se calcula a partir de la siguiente ecuación, suponiendo que la intensidad de la radiación difusa es isotrópica<sup>6</sup>:

$$H_d = b \cdot (1 - \tau) \cdot (1 + \cos\beta) \cdot H_0 \beta \gamma \quad \text{Ec.35}$$

La radiación total global diaria sobre el plano inclinado corresponde a la suma de las componentes directa y difusa:

$$H_g = H_b + H_d \quad \text{Ec.36}$$

### **Modelo PINSOL**

La rutina PINSOL es parte del programa ERHYM<sup>7</sup> (Elakala Rangeland Hydrology and Yield Model), perteneciente al Ministerio de Agricultura de USA, el cual estima la irradiancia solar extraterrestre diaria, a partir de la relación astronómica entre la Tierra y el Sol, como insumo para simular balance hídrico. Dicho modelo fue modificado por Aburto (2007) y Urbina (2007) para estimar la Radiación Solar Global (RSG) incidente sobre un plano arbitrario en la superficie terrestre, basándose en el procedimiento descrito por Iqbal (1983).

---

<sup>6</sup> Misma intensidad en todas direcciones.

<sup>7</sup> <http://ecobas.org/www-server/rem/mdb/erhym.html>

## **Cálculo de interrupciones de la irradiancia sobre una superficie.**

Para calcular la irradiancia teórica en una superficie cualquiera, además de los factores astronómicos, es necesario considerar las condiciones terrestres que atenúan la llegada de dicha radiación, es decir, variables atmosféricas y topográficas locales, que pueden crear fuertes gradientes locales de insolación. Para éstos no hay métodos universales de cálculo, pues su variabilidad es muy extensa (Ruiz, 2008; Fu y Rich, 2000; Meza y Varas, 2000).

Para el cálculo de las interrupciones atmosféricas, se calibró el modelo Pinsol mediante una interpolación segmentada de los coeficientes de un ajuste polinomial de segundo orden entre el Coeficiente de Transparencia mensual ( $K$ ) y la Cobertura Nubosa ( $C$ ). Paralelamente, se utilizó el método de Souza *et al.* (2003) para el cálculo de obstáculos generados por la morfología urbana.

### **Interrupciones generadas por la atmósfera.**

Cada uno de los elementos que componen la atmósfera interactúa de distinta manera con la radiación solar que ingresa a la superficie terrestre, afectando su dirección e intensidad inicial. La magnitud de esta interacción depende principalmente de la composición de la atmósfera y de la longitud del camino recorrido por los rayos del Sol.

Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera se transforma en radiación difusa, debido al fenómeno de dispersión molecular por parte de los aerosoles presentes en el aire. Otra parte de la radiación solar es absorbida por la atmósfera, proceso que se debe mayoritariamente al ozono, vapor de agua y dióxido de carbono (Liou, 1980).

La radiación de mayor energía (rayos gamma y rayos X) impacta a los átomos de la atmósfera y pierden energía a unos 80 kilómetros de la superficie. El mismo proceso ocurre con la radiación ultravioleta a 50 kilómetros de altura. Sólo llega a la superficie terrestre la luz del espectro visible, junto con algunos rayos infrarrojos y ondas de radio, además de una pequeña parte de rayos ultravioleta de longitud de onda más larga (Iqbal, 1983; citado por Aburto, 2007).

Para estimar la incidencia de los procesos que ocurren entre el aire y la radiación solar, se suele clasificar la atmósfera terrestre de acuerdo a la cantidad de cielo cubierto. En términos generales, la Nubosidad ( $C$ ) o cobertura nubosa corresponde a la cantidad de área de cielo cubierta a causa de la presencia de nubes en la atmósfera (Iqbal, 1983).

## Coefficiente de transparencia de la atmósfera

Como la estructura físico-matemática de los procesos que ocurren entre la atmósfera y la radiación solar es compleja, modelar este sistema puede llegar a ser complejo. La variable más utilizada para estos fines corresponde al coeficiente  $K$ , que representa la fracción de energía solar que ingresa a la superficie terrestre atravesando el espesor del medio atmosférico (Liou, 1980). Según esta definición, una expresión simple para determinar el comportamiento de esta variable es a través del cociente entre la radiación solar global que llega a la superficie terrestre y la radiación solar en el exterior de la Tierra, como lo indica la siguiente ecuación.

$$K = \frac{R_g}{R_e} \quad \text{Ec. 37}$$

En la ecuación anterior,  $R_g$  es la RSG medida sobre la superficie y  $R_e$  corresponde a la RSE sobre una superficie horizontal calculada a partir de fórmulas astronómicas. Gracias a estudios desarrollados en las últimas décadas, se sabe que existe una relación entre  $K$  y  $C$ . A través de esta dependencia se han establecido varias expresiones que determinan satisfactoriamente este coeficiente (De Francisco y Castillo, 1985; citados por Aburto, 2007).

Considerando esta relación, el coeficiente  $K$  se calculó utilizando la ecuación 37, a partir de datos de medias mensuales de radiación global horizontal y radiación extraterrestre para 88 estaciones meteorológicas a lo largo de Chile (Figura 8). En base a éstos, se realizó un ajuste polinómico de grado dos, siguiendo el método propuesto por Black (1956; citado por Iqbal, 1983).

Para la evaluación de dicho ajuste, se utilizaron datos de la estación “La Platina INIA” de la DMC, la cual se encuentra ubicada en la comuna de La Pintana, muy cercana al lugar escogido para realizar las simulaciones, y cuenta con una serie de datos de RSG de 19 años, y de 28 años de datos de nubosidad.

Como indicador se usó el Error Cuadrado Medio (ECM), el cual es recomendado como una buena medida de bondad de ajuste (Yang y Hodler, 2000; citado por Neira, 2010).

$$ECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2}{N}} \quad \text{Ec. 38}$$

donde  $O_i$  corresponde a los datos correspondientes a los valores de La Platina,  $E_i$  a los valores obtenidos de la modelación y  $N$  al total de datos.

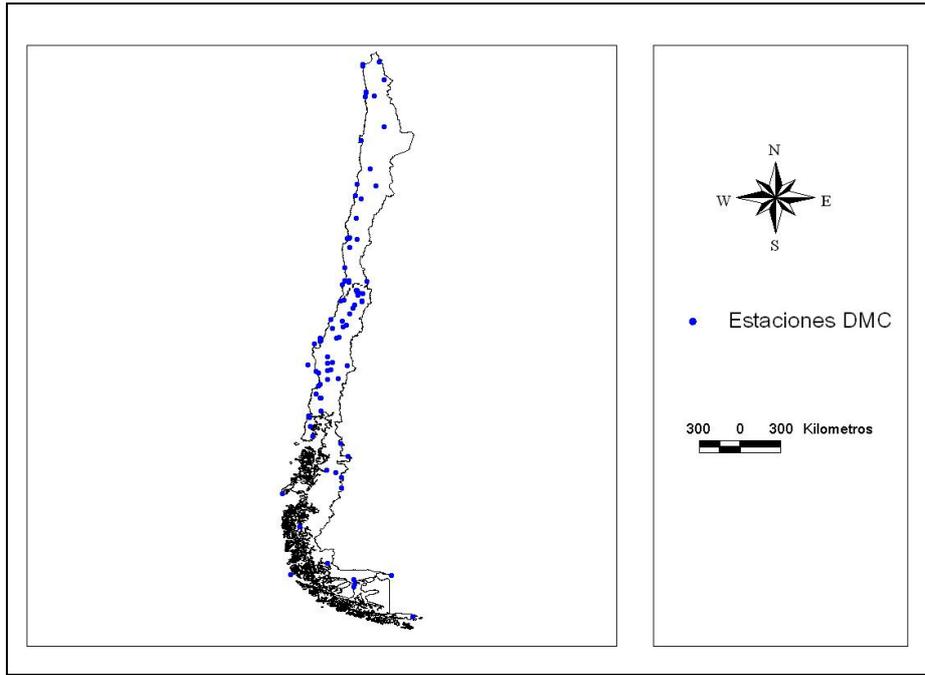


Figura 8. Estaciones meteorológicas de la DMC..  
Fuente: Elaboración propia.

### Espesor atmosférico

Como se mencionó anteriormente, cuando los rayos solares atraviesan un medio, cada molécula o partícula presente en ese medio atenúa de manera particular la energía que transporta la radiación solar a través del medio. El grado de atenuación que ocurra depende del tipo y número de moléculas o partículas que se interpongan en la trayectoria de los rayos solares, el que también es proporcional a la distancia que tienen que atravesar los rayos solares para llegar a la superficie terrestre. El cálculo de esta distancia, denominada trayectoria longitudinal “ $l$ ”, permite conocer la magnitud de la influencia de la atmósfera sobre la radiación solar (Lissi y Sanhueza, 1996; citados por Aburto, 2007).

La densidad de la atmósfera, multiplicada por la trayectoria longitudinal, representa la masa de una sustancia en una columna para una determinada sección transversal. A esta definición se le denomina comúnmente “masa óptica” (también conocida como “espesor óptico” o “espesor atmosférico”), el cual se obtiene a través de la siguiente expresión.

$$m = \int_0^{\infty} \rho \cdot ds \quad \text{Ec. 39}$$

donde  $m$  es la masa óptica en cualquier dirección longitudinal,  $ds$  corresponde a la trayectoria longitudinal geométrica de los rayos solares cuando ingresan a la Tierra desde el Sol y  $\rho$  es la densidad de la atmósfera en la trayectoria  $ds$ . La integral de esta ecuación se realiza a lo largo de una trayectoria  $s$ , correspondiente a la distancia atravesada por los rayos solares desde el límite superior de la atmósfera hasta la superficie terrestre (Iqbal, 1983).

Cuando el Sol está ubicado en la línea del cenit, la trayectoria longitudinal de los rayos solares presenta una dirección perpendicular a la superficie terrestre. En este caso, la trayectoria longitudinal geométrica de los rayos solares cuando atraviesan la atmósfera terrestre  $ds$ , correspondería a la altura a la cual se encuentra un determinado elemento sobre el nivel del mar  $dz$ . De esta manera, para determinar la masa óptica en la dirección vertical a la superficie terrestre se utiliza la siguiente ecuación.

$$m_v = \int_0^{\infty} \rho \cdot dz \quad \text{Ec. 40}$$

donde  $m_v$  es la masa óptica en la dirección vertical,  $z$  representa a la distancia a lo largo de la dirección vertical,  $dz$  es la trayectoria vertical de los rayos solares cuando ingresan a la Tierra desde el Sol, y  $\rho$  corresponde a la densidad de la atmósfera en la trayectoria  $dz$ . Esta ecuación determina la masa óptica de una sustancia en una columna vertical para una determinada sección transversal. No obstante, es necesario señalar que en una atmósfera real la densidad varía con respecto a la altura y la trayectoria de los rayos solares sigue una dirección con cierto grado de desviación, lo que se debe principalmente a la refracción de la atmósfera y a la curvatura de la Tierra (Iqbal, 1983).

Existe un concepto conocido como “masa óptica relativa” ( $m_r$ ) el cual permite evaluar el espesor atmosférico considerando la integración a lo largo de una trayectoria longitudinal cualquiera con respecto a la dirección del cenit. La masa óptica relativa es definida como la razón entre la masa óptica a lo largo de una trayectoria longitudinal cualquiera y la masa óptica a lo largo de la trayectoria vertical en dirección del cenit, tal como se describe en la siguiente expresión.

$$m_r = \frac{\int_0^{\infty} \rho \cdot ds}{\int_0^{\infty} \rho \cdot dz} \quad \text{Ec. 41}$$

La masa óptica relativa es una función de la distribución de la densidad atmosférica y del índice de refracción de la atmósfera con respecto a la altura. En este sentido, el espesor de la atmósfera correspondiente a un observador ubicado en lo alto de una montaña será diferente al valor que se registra para un observador ubicado en una superficie a nivel del mar (Cañada y Salvador, 1997). Ignorando la curvatura de la Tierra y suponiendo que la atmósfera es una capa no refractaria y completamente homogénea, es posible determinar la masa óptica relativa aplicada a todos los constituyentes de la atmósfera a través de la siguiente ecuación (Lissi y Sanhueza, 1996; citados por Aburto, 2007):

$$m_r = \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad \text{Ec. 42}$$

Como es de suponer, el error en esta ecuación esta causada por la curvatura de la Tierra y la refracción de la atmósfera real que no fueron consideradas, y corresponde a 0,25% en un ángulo de incidencia igual a  $60^\circ$ , error que aumenta a 10% para un ángulo de incidencia igual a  $85^\circ$ . En consecuencia, para ángulos de elevación mayores a  $10^\circ$ , los efectos de la refracción en la atmósfera son despreciables. En este caso, la masa óptica relativa viene dada por la siguiente ecuación (Iqbal, 1983):

$$m_r = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1}{\cos(\theta_z)} \quad \text{Ec. 43}$$

donde  $P$  es la presión atmosférica en el lugar de observación y  $P_0$  corresponde a la presión atmosférica al nivel del mar. La relación entre ambas presiones atmosféricas corrige los efectos de la altitud con respecto a la masa óptica relativa a través de la siguiente expresión:

$$\frac{P}{P_0} = e^{[-0.0001184 \cdot z]} \quad \text{Ec. 44}$$

donde  $z$  es la altitud en el lugar de observación medida en metros sobre el nivel del mar.

### Transmisividad atmosférica

Uno de los fenómenos relacionados con la radiación solar incidente en la Tierra y mencionado anteriormente corresponde a la Transmisividad ( $\tau$ ), concepto definido como la fracción de energía incidente a una longitud de onda dada que es transmitida por un determinado medio. La atmósfera terrestre representa el medio principal que permite la transmisión de una porción de ciertas longitudes de onda del espectro de radiación solar que llega desde el Sol a la superficie de la Tierra (Campbell, 1995).

El fenómeno de transmisividad de la atmósfera se ha comprobado gracias a la comparación entre la magnitud del flujo de energía solar incidente en el límite exterior de la atmósfera y la magnitud de energía solar incidente en la superficie. En el límite superior de la atmósfera, la densidad del flujo radiante sobre una superficie normal a la dirección de propagación de los rayos solares es equivalente a la constante solar. Sin embargo, cuando esta radiación atraviesa un espesor determinado de atmósfera, la energía es atenuada por los fenómenos de absorción y dispersión, con lo que la densidad del flujo radiante que llega a una superficie a nivel del suelo normal a la dirección de propagación es inferior a la magnitud de la constante solar (Lissi y Sanhueza, 1996).

En consecuencia, a partir de esta explicación es posible deducir que para poder determinar  $\tau$  es necesario considerar el coeficiente  $K$  y el espesor atmosférico. En este sentido, matemáticamente se han desarrollado ciertas expresiones a través de las cuales es posible obtener  $\tau$ , relacionando de distinta manera los dos factores atmosféricos necesarios. Una de ellas determina que la densidad del flujo radiante que atraviesa la atmósfera terrestre, para luego llegar a la superficie de la Tierra, crece exponencialmente con respecto al espesor atmosférico, de acuerdo con la siguiente expresión (Iqbal, 1983):

$$\tau = K^m \quad \text{Ec. 45}$$

donde  $\tau$  representa la transmisividad de la atmósfera,  $K$  es el coeficiente de transparencia y  $m$  corresponde al espesor atmosférico.

## Cálculo de interrupciones generadas por morfología urbana.

El modelo PINSOL fue modificado para integrar en sus cálculos éstas obstrucciones, según el método planteado por Robinson (2004), quien plantea el uso de la proporción del cielo que puede visto  $\sigma$  ( $0 < \sigma < 1$ ), con lo que se tiene la siguiente solución general para irradiancia global ( $\text{W m}^{-2}$ ):

$$I = R \cdot \sigma \quad \text{Ec.46}$$

donde  $R$  es la irradiancia directa ( $\text{W m}^{-2}$ ), y  $\sigma$  es el factor de cielo visible (SVF, por sus siglas en inglés,  $0 < \sigma < 1$ ). La irradiancia difusa, al ser considerada isotrópica, asume que no hay obstáculos que interrumpan la trayectoria de la radiación.

El factor de visión del parche  $\sigma$  puede dar cuenta de autoobstrucciones, así como de objetos adyacentes, de modo que se tiene un método para obtener irradiancia sensible a obstáculos. Éste representa una estimación de la zona visible del cielo desde el punto de vista de la Tierra, correspondiendo a una parametrización adimensional derivada del área celeste que resulta de los límites de cañones urbanos.

Souza *et al.* (2003) sugiere el uso de un entorno SIG para la simulación de una representación espacial de los obstáculos de cañones urbanos para la bóveda celeste<sup>8</sup> mediante la herramienta llamada “3DSkyView”, la cual sustituye el uso de la cámara de lente “ojo de pez” de 180° con un algoritmo de cálculo y visualización. Éste determina las dimensiones angulares entre el observador (en este caso, las envolventes de un edificio cualquiera) y las obstrucciones de la bóveda celeste causadas por la morfología urbana adyacente. Dichos ángulos permiten proyectar el cañón urbano en un plano bidimensional, en un proceso donde la proyección estereográfica es una herramienta muy útil. La proyección estereográfica de un cañón urbano es una proyección azimutal, en la cual los puntos de elementos urbanos son proyectados hacia la superficie de la bóveda celeste (que es una superficie esférica) y luego son transferidas al plano ecuatorial de la misma esfera. Esta transferencia es posible por la unión de cada punto de la superficie esférica superior al punto de fuga del Nadir, como se muestra en la Figura 9. De esta manera, cualquier punto de la esfera se proyecta en el círculo que representa la bóveda celeste en proyección plana.

Para estimar el valor de este factor, dicha esfera es dividida de forma homogénea, y sus partes proyectadas estereográficamente al plano ecuatorial, creando una “estereorred”<sup>9</sup> (Figura 10). Para la estereorred, se mantuvo un espaciamiento regular de 5 grados tanto para los ángulos de altitud como de latitud en toda la bóveda celeste, siguiendo las recomendaciones de diversos autores (Souza *et al.*, 2003; Autodesk, 2009; Robinson, 2004). Sobreponiendo ésta estereorred en la proyección del plano ecuatorial de las obstrucciones, sus partes (es decir, el cielo y las zonas de obstáculos) pueden ser comparadas con la superficie total del cielo total disponible, determinando su proporción.

<sup>8</sup> Esfera ideal, sin radio definido, concéntrica en el globo terrestre, en la cual aparentemente se mueven los astros

<sup>9</sup> En geometría, corresponde la proyección estereográfica de un mapeo en particular que proyecta una esfera sobre un plano.

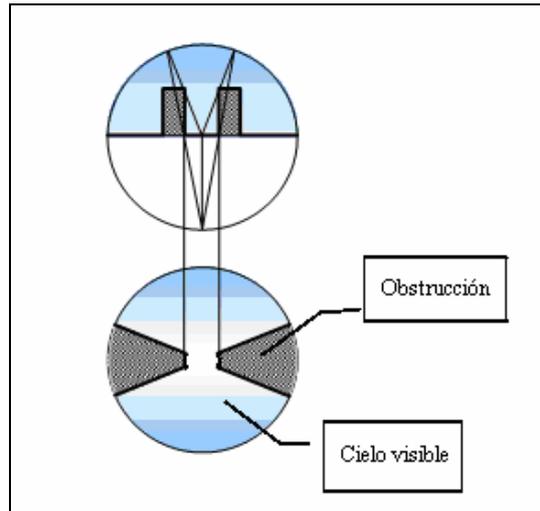


Figura 9. Proyección estereográfica de un cañón urbano.  
Fuente: Adaptado de Souza *et al.*, 2003.

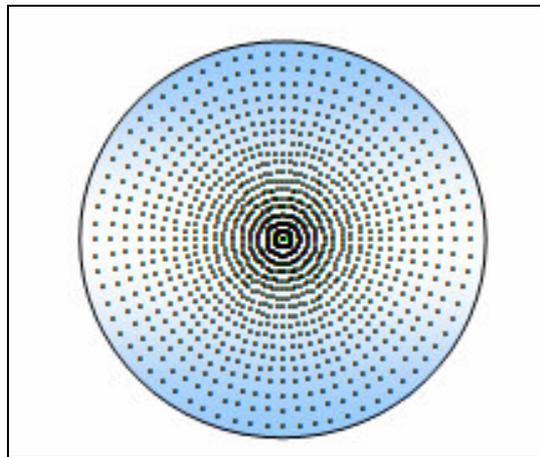


Figura 10. Estereorred. Fuente: Souza *et al.*, 2003.

La extensión 3DSkyView<sup>10</sup> es una herramienta que calcula el factor  $\sigma$  de cañones urbanos, que trabaja en un entorno creado por ArcView versión 3.2, con su extensión 3D Analyst activado. En términos prácticos, el objetivo de 3DSkyView es identificar un nuevo sistema de coordenadas de los elementos urbanos tridimensionales, de modo que puedan ser representados en proyección estereográfica en un plano bidimensional, permitiendo de esta manera el cálculo del parámetro  $\sigma$ .

Este nuevo sistema de coordenadas de una proyección estereográfica se refiere a las relaciones tridimensionales en el cañón. Hay tres ángulos importantes en el cañón que determinan la escena, como se muestra en la Figura 11: primero, el ángulo horizontal  $\alpha$ , creado entre los ejes Norte-Sur espectador, en el plano horizontal del observador y el punto de interés; segundo, el ángulo vertical  $\beta$ , entre el plano de espectador y el punto de interés; y en tercer lugar, el ángulo del punto de fuga del Nadir  $\theta$ , entre el plano vertical que contiene el punto de Nadir y la línea proyectada desde el punto de interés hacia el punto de fuga.

<sup>10</sup> <http://arcscripsts.esri.com/details.asp?dbid=12810>

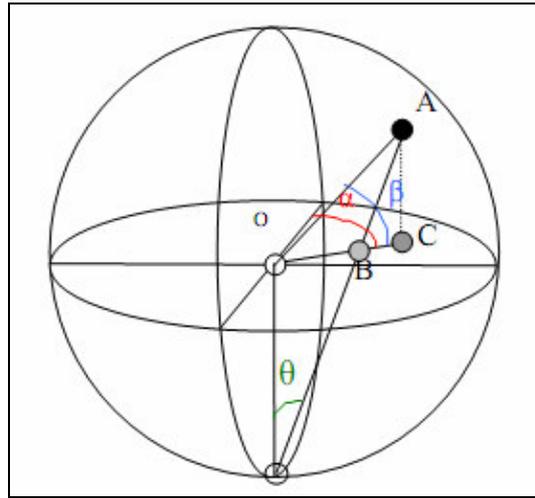


Figura 11. Proyección estereográfica y ángulos.  
Fuente: Souza *et al.*, 2003.

Considerando que el observador se encuentra en una posición variable y respecto a las particularidades que  $\alpha$  siempre debe estar relacionado con el plano vertical que contiene el visor (punto  $O$  en la Figura 11) y  $\beta$  que siempre debe estar relacionado con el plano horizontal del observador, esos ángulos son comparables a los ángulos de acimut y altitud, que pueden determinarse con facilidad. El ángulo  $\theta$  puede ser calculado por la ecuación 47, pues corresponde a un triángulo isósceles.

$$\theta = \frac{90 - \beta}{2} \quad \text{Ec.47}$$

La proyección estereográfica en el plano ecuatorial determina un segmento ( $OB$ ), desde la posición del mirador  $O$  al punto proyectado  $B$  en la Figura 11, la cual es calculada por la ecuación 48. La variable  $r$  es el radio del círculo en el plano ecuatorial que se consideró para la representación de proyección estereográfica.

$$\overline{OB} = r \cdot \tan(\theta) \quad \text{Ec.48}$$

Las nuevas coordenadas pueden ser expresadas por las ecuaciones 49 y 50, que componen el nuevo sistema de coordenadas en una proyección estereográfica. Aquí el ángulo  $\alpha$  fue sometido a un ajuste de manera de obtener el mismo origen de las relaciones trigonométricas. Esto se hace porque  $\alpha$  se calculó con base en el lado Norte que corresponde a  $0^\circ$ , mientras que el mismo ángulo para el cálculo trigonométrico corresponde al lado Este. Ésta rotación es la razón de la sustracción del valor de  $\alpha$  de  $90^\circ$  en las ecuaciones 49 y 50.

$$x = \cos(90 - \alpha) \cdot \overline{OB} \quad \text{Ec.49}$$

$$y = \sin(90 - \alpha) \cdot \overline{OB} \quad \text{Ec.50}$$

Con las nuevas coordenadas de los puntos de interés, es posible tener la proyección estereográfica, trazándolos en el plano horizontal en ArcView GIS. La determinación de  $\sigma$  es entonces sólo una cuestión de la manipulación espacial de capas mediante la superposición de una estereored de radio igual a la proyección estereográfica de la escena. El valor de  $\sigma$  se calcula por la ecuación 51, donde  $q$  es la zona visible del cielo y  $Q$  es el área total del cielo, definido por el área del círculo aplicada en la proyección estereográfica.

$$\sigma = \frac{q}{Q} \quad \text{Ec.51}$$

Dado un radio de círculo en el que será proyectado el cañón urbano, se debe especificar una capa de polígonos que contiene la altura y la elevación de los elementos urbanos combinados en el mismo, con el fin de iniciar la aplicación. Una capa con el punto de observación y con los atributos de altura y elevación de los objetos también debe ser definido (Figura 12). Para el presente caso de estudio, estos valores fueron definidos como 510 m.s.n.m de altitud, y 5 metros de altura para cada fachada (la mitad de la altura total de éstas).

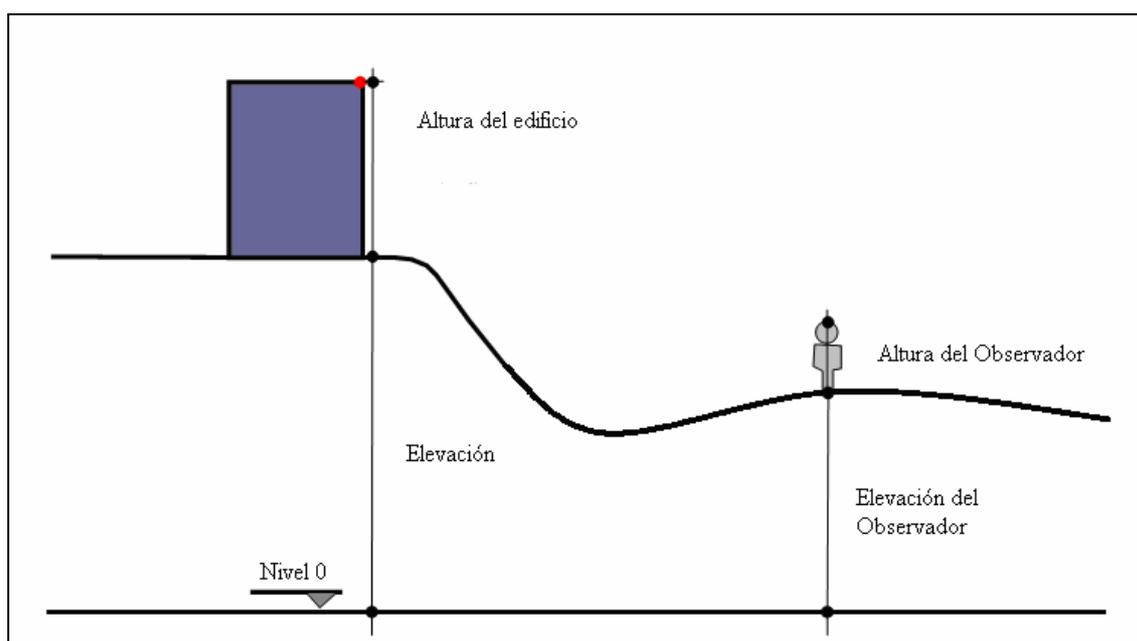


Figura 12. Variables de altura y elevación. Fuente: Adaptado de Souza *et al.*, 2003.

## **Modelo Ecotect.**

El programa computacional Ecotect calcula la irradiancia sobre las envolventes de edificios mediante los métodos descritos por Szokolay (2004) y Geoffrey *et al.* (1995) (citados por Autodesk, 2009), dividiendo la radiación incidente en sus componentes, y utilizando la geometría del modelo, además de registros horarios de radiación solar directa y difusa en un plano horizontal incorporados en un archivo de datos meteorológicos (Weather Data File).

## **Datos de entrada.**

Por defecto, la base de datos de Ecotect no incluye la ciudad de Santiago, por lo que ésta debió ser generado a partir de las bases de datos del “International Weather for Energy Calculations”<sup>11</sup> (IWEC), disponible en los servidores de la Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables (Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, EERE) del Ministerio de Energía de los EE.UU., el cual contiene datos meteorológicos "típicos" en archivos de formato ASCII, adecuados para el uso con programas de simulación de energía en edificios. Los archivos IWEC han sido creados basándose en series de hasta 18 años de datos meteorológicos horarios, originalmente archivados en el “National Climatic Data Center”. Los datos meteorológicos han sido complementos con cálculos de radiación solar horaria a partir de la geometría Tierra-Sol y elementos meteorológicos horarios, particularmente a partir de la nubosidad<sup>12</sup>.

## **Cálculo de irradiancia.**

En todo el software de Square One® (Marsh, 2008), la radiación solar incidente se calcula a partir de:

Radiación Directa ( $G_{beam}$ ): En el archivo de datos meteorológicos, el componente de haz directo de la radiación solar se da como un valor en  $W\ m^{-2}$ , y se mide en una superficie imaginaria directamente frente al sol. Como el sol se mueve por el cielo, esta superficie de medición sigue este movimiento para que la dirección de la radiación incidente sea siempre normal (recto) a la misma.

Radiación Directa Horizontal ( $G_{dirHor}$ ): La radiación directa horizontal difiere de haz directo en que se mide sobre un plano horizontal. En este caso, el componente de haz directo es modificado por el coseno del ángulo de incidencia (A) en la que llega a la superficie horizontal. Así, puede calcularse como:

$$G_{dirHor} = G_{beam} \cdot \cos(A) \quad \text{Ec. 52}$$

Radiación Difusa Horizontal ( $G_{difHor}$ ): El componente horizontal difuso se da también en  $W\ m^{-2}$  y se toma como la energía de toda la bóveda celeste que cae sobre una superficie horizontal, menos los efectos de la radiación directa que ya inciden el

---

<sup>11</sup>[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/software.cfm/ID=369/pagename=alpha\\_list](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/software.cfm/ID=369/pagename=alpha_list)

<sup>12</sup>[http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data3.cfm/region=3\\_south\\_america\\_wmo\\_region\\_3/country=CHL/cname=Chile](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data3.cfm/region=3_south_america_wmo_region_3/country=CHL/cname=Chile).

horizontal. Esto es importante, ya que significa que la radiación del cielo bajo, cerca del horizonte, llega a la superficie de medición plana en incidencia casi rasante, contribuyendo mucho menos que la luz del cenit, que incide en la superficie de manera perpendicular o cerca de ésta. Los valores de radiación difusa horizontal asumen que no hay obstáculos que oscurezcan parte del cielo.

Radiación Global Horizontal ( $G_{globHor}$ ): es la suma de las componentes directa y difusa, incidentes sobre un plano horizontal. Por lo tanto, la suma de los valores de incidencia horizontal directa y horizontal difusa:

$$G_{globHor} = G_{dirHor} + G_{diffuse} \quad \text{Ec. 53}$$

Radiación Global: ésta difiere de la global horizontal en que se trata de un máximo teórico, dado que la suma de haz directo y valores horizontales de radiación difusa.

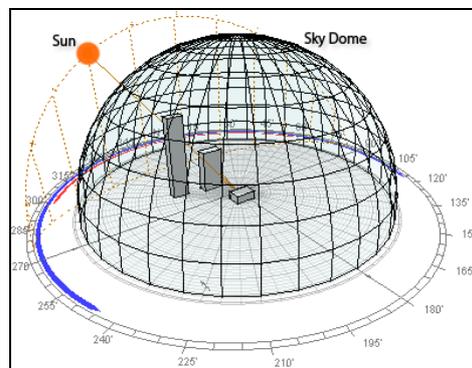


Figura 13. El Sol como una fuente puntual directa y el cielo como una fuente hemisférica difusa. Fuente: Marsh, 2008.

### Cálculo de interrupciones.

Ecotect utiliza las técnicas de trazado de rayos en lugar de los cálculos de factor de vista, generando una serie de rayos desde puntos de muestreo distribuidos sobre la superficie de interés y calculando la obstrucción en cada uno de ellos. La fracción de la superficie expuesta o en la sombra en cualquier momento se calcula en función del número de rayos obstruido en comparación con el número total que se generan.

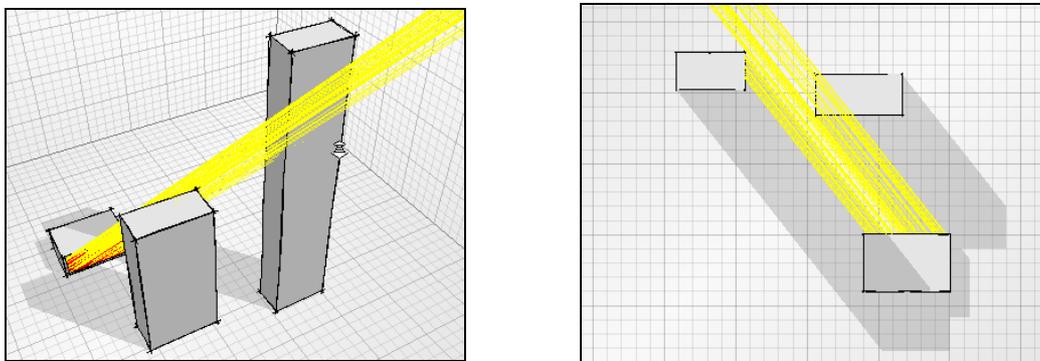
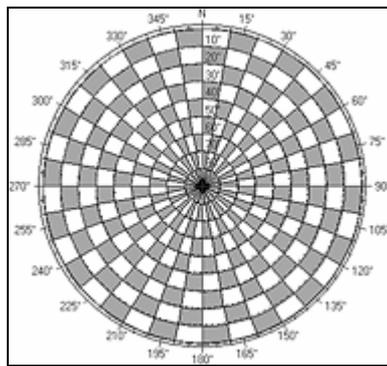


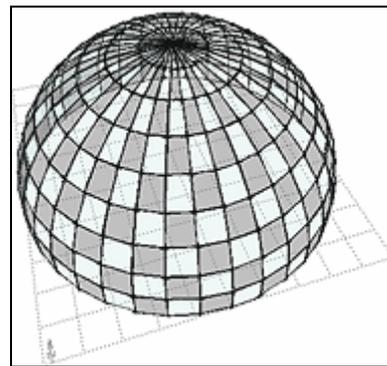
Figura 14. Utilización de una serie de rayos de muestra para calcular el factor de vista, que se muestra en 3D (izquierda) y vista planta (derecha). Fuente: Marsh, 2008.

## Máscaras de Sombreado

Por defecto, Ecotect divide la bóveda celeste en segmentos de 5 grados, tanto en acimut como en altitud. A medida que el Sol se mueve, establece en qué segmento del cielo está, para luego leer los datos de sombreado para ese segmento. Las máscaras de sombreado son generadas y almacenadas para cada superficie del modelo. Éstas se almacenan en el modelo asociado y son utilizados en una serie de simulaciones, entre las que se encuentra la radiación solar incidente.



Representación en un diagrama de trayectoria del Sol



Representación en parches 3D

Figura 15. División del cielo en segmentos y precálculo de la sombra en cada segmento da una máscara de sombra. Fuente: Marsh, 2008.

Al calcular una máscara de sombra, Ecotect almacena tres capas de información para cada segmento: i) el sombreado de obstáculos externos; ii) el efecto del ángulo de incidencia (básicamente el coseno de dicho ángulo); y iii) la fracción de la radiación debida al reflejo en los obstáculos externos hacia el objeto.

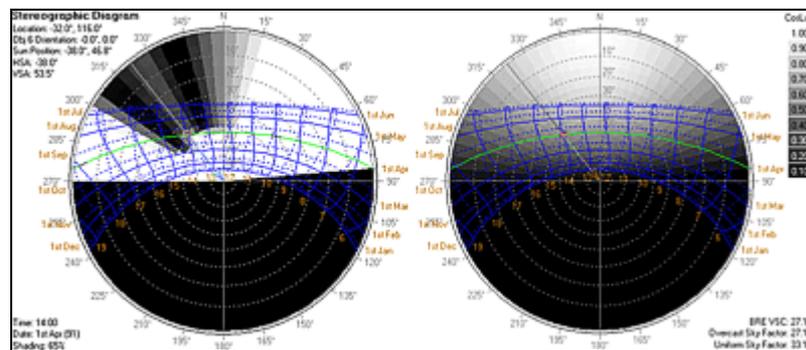


Figura 16. Máscaras de sombreado (izquierda) y los efectos del ángulo de incidencia (derecha). Fuente: Marsh, 2008.

Cada capa esencialmente actúa como un filtro. Al cargar un archivo de datos meteorológicos, es posible leer los valores por hora de la radiación solar y se construyen de dos capas adicionales: iv) la radiación solar difusa y; v) la radiación solar directa asignada en los segmentos mismo cielo. Éstas dos últimas capas representan la distribución de cielo acumulada con diferentes valores generados en cada segmento en función de los valores cambiantes de grabado radiación solar directa, la posición del sol radiante y la distribución promedio de la radiación difusa.

Al realizar los cálculos de acceso solar, estas distribuciones del cielo son precalculadas sobre la fecha fijada y un intervalo de tiempo, con las capas de incidencia, sombras y reflejos para cada objeto en el estudio simplemente superpuestas, según sea necesario para calcular el resultado.

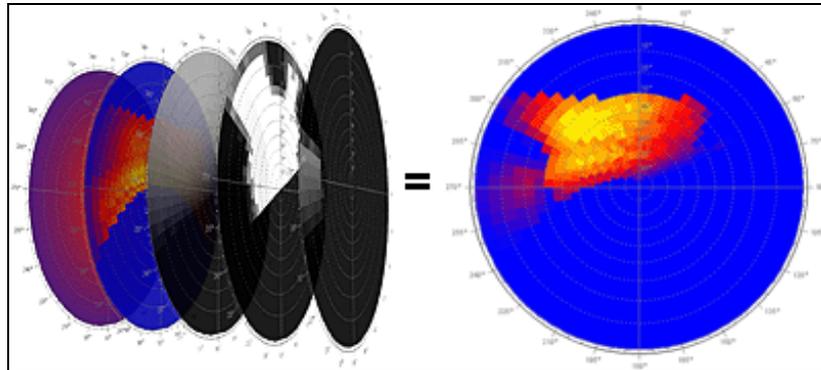


Figura 17. Conjunto de máscaras de sombra, junto con la distribución directa y difusa acumulativas del cielo.  
Fuente: Marsh, 2008.

Uso de máscaras de sombreado en los cálculos:

Una vez que Ecotect tiene todos los datos precalculados y almacenados en las diferentes capas de cada segmento, los cálculos de acceso a la energía solar y la radiación incidente son relativamente simples. Para cada segmento, la radiación difusa y componentes directos son sumados para obtener el valor total de radiación acumulada. La radiación reflejada efectivamente reduce el efecto de sombreado, por lo que las capas de sombra y reflexión deben sumarse. Estos dos valores sumados, junto con el efecto de la incidencia se multiplican para dar la radiación incidente total en ese segmento.

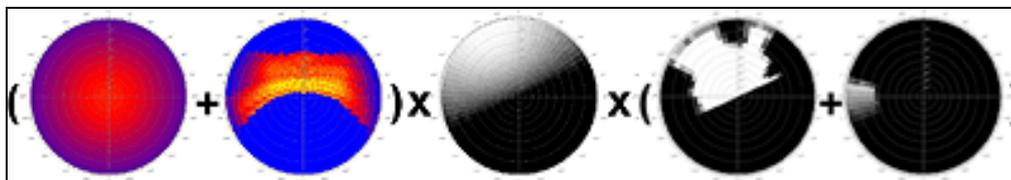


Figura 18. Procedimiento matemático para calcular el acceso y la radiación solar incidente a partir de los valores de las máscaras de sombreado. Fuente: Marsh, 2008.

## Comparación de los Modelos.

El método habitual para estimar la radiación solar en superficie horizontal es mediante medidas en tierra proporcionadas por radiómetros en redes dispersas, y su cálculo en puntos diferentes a las estaciones se realiza mediante interpolación o extrapolación de los valores obtenidos. Este método es válido en lugares donde la variabilidad de los valores de radiación no es muy grande, pero resulta inadecuado si entre los puntos de recepción de datos se encuentran zonas cuyo comportamiento desde el punto de vista radiativo es muy diferente, como ocurre con aquellos lugares de una gran complejidad topográfica. En estos casos, la estimación de la radiación solar debe resolverse mediante redes radiométricas muy densas, de alto costo y gran dificultad de mantenimiento (Batlles *et al.*, 2006).

Como se mencionó anteriormente, las bases de datos de irradiancia solar en planos inclinados disponibles para la zona de estudio son escasas y, además, presentan errores intrínsecos en su construcción. Es por ello que para evaluar la exactitud del modelo propuesto se optó por usar un método alternativo, comparando los resultados obtenidos respecto de estimaciones realizadas el modelo comercial Autodesk® Ecotect como referencia. Cabe destacar que: i) dicho modelo es usualmente utilizado por arquitectos y profesionales afines para la estimación del recurso solar en edificaciones<sup>13</sup>; ii) ésta comparación **no** reemplaza la validación del modelo mediante mediciones con instrumentos. Para este fin, se generó un modelo 3D del edificio de la Biblioteca Ruy Barbosa, ubicada en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile y sus alrededores (edificios cercanos), mediante el programa Google Sketch Up, versión 6.0, y se exportó dicho modelo en formatos compatibles tanto con ArcView 3.2 como con Ecotect 5.6, sobre los cuales se realizaron cálculos de irradiancia global media diaria.

Como indicador de acierto se usó el Coeficiente de Determinación ( $R^2$ ), el cual entrega una medida en porcentaje de la variación de los datos simulados explicado por el modelo lineal, midiendo lo cerca que está la nube de puntos de la recta de regresión, se mueve en un intervalo entre -1 y +1, con 0 indicando una ausencia de correlación entre las variables. Además, se utilizó el índice de eficiencia del modelo Nash-Sutcliffe (NSEff), el cual es un estadígrafo normalizado que determina la magnitud relativa de la varianza de los residuos comparada con varianza de los datos, indica el grado de ajuste y dispersión de los datos respecto a la línea 1:1.

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - Q_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad \text{Ec. 54}$$

NSEff tiene un rango entre  $-\infty$  y 1, donde 1 representa el ajuste perfecto, 0 indica que las predicciones del modelo son tan precisas como la media de los datos observados, y valores menores que 0 indican que la media observada es mejor predictor que el modelo. Esencialmente, mientras más se acerque la eficiencia del modelo a 1, más preciso es éste (Nash and Sutcliffe, 1970; citado por Zambrano, 2010)

---

<sup>13</sup> Luz Alicia Cárdenas, Profesor Asociado, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, 2009; Constanza Jara, Arquitecto Magíster en Eficiencia Energética, Directora de Proyectos, Consultora Renovarq, 2009 (Comunicación personal).

## Resultados y Discusión

### *Calibración del modelo Pinsol para la ciudad de Santiago, RM.*

En la Figura 19 se puede apreciar la relación inversa que presentan las variables de Nubosidad y el Coeficiente de Transparencia, además el grado de ajuste de la curva ( $R^2 = 0.74$ ) y EMC = 0.01 ( $n = 1079$ ). Esto indica la existencia de una interdependencia en la variación conjunta de los datos, por lo que se puede afirmar que el modelo tiene la capacidad de aproximarse a una serie real.

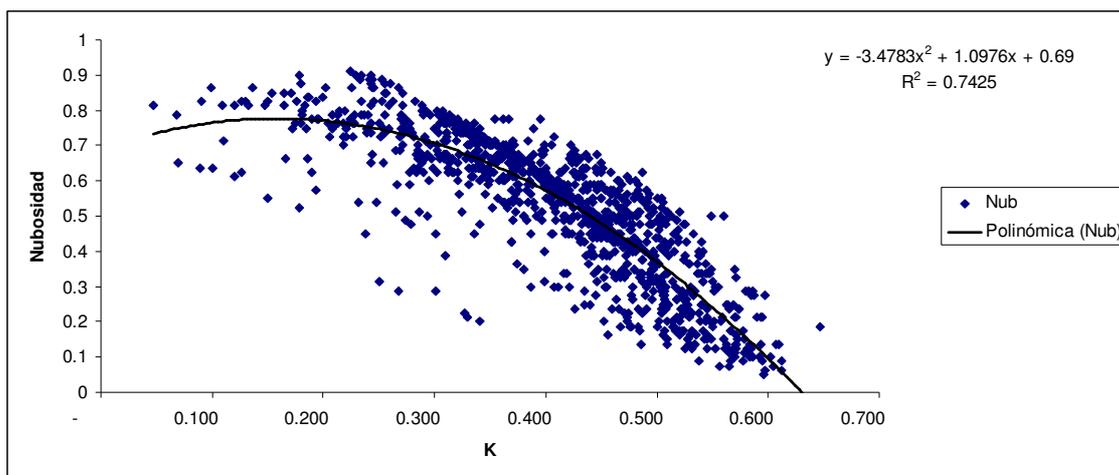


Figura 19. Dispersión entre las series de Coeficiente de Transparencia y Nubosidad.

La base de datos de la DMC permitió calcular satisfactoriamente el Coeficiente de Transparencia de la atmósfera en la Región Metropolitana, a pesar de considerar 88 estaciones a lo largo de Chile (lo que implica una generalización del modelo en el territorio).

Por otra parte, la Figura 20 muestra la evaluación del modelo de cálculo del factor  $K$  según Black (1956) y datos observados de la estación meteorológica INIA La Platina. El ajuste tiene un error EMC de 0.1 ( $n=12$ ). En los meses de mayor irradiancia, el modelo sobreestima la opacidad de la atmósfera, mientras que en los meses de menor irradiancia subestima dicho valor. Esto se explica por lo mencionado en el párrafo anterior.

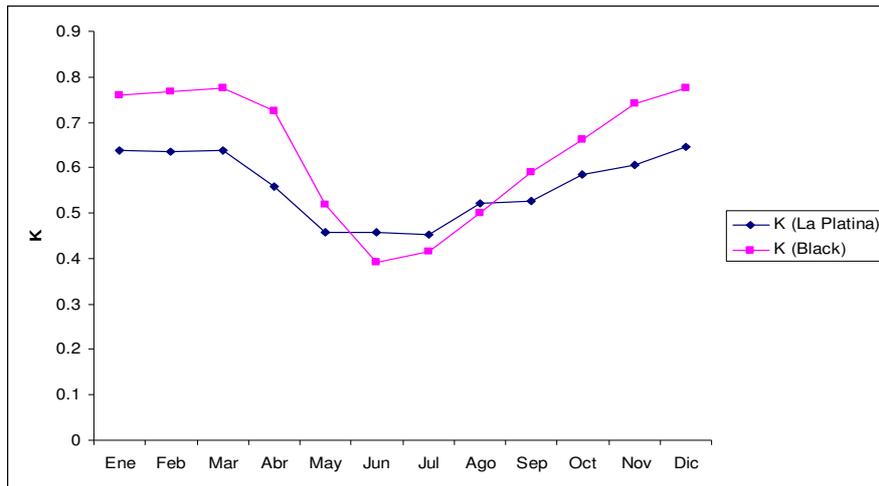


Figura 20. Medias mensuales del Coeficiente de Transparencia ( $K$ ) para la estación La Platina INIA y las obtenidas de la modelación en el mismo sector.

En la Figura 21 se puede apreciar los resultados del cálculo de la RSG de los modelos utilizados respecto de los datos de la estación La Platina INIA. Se observa que el modelo Ecotect sobreestima la irradiancia global durante todo el año, mientras que el modelo Pinsol sobreestima solamente durante los meses estivales. En el resto de los meses, dicho modelo subestima la radiación incidente, acorde a la tendencia mostrada por el coeficiente  $K$ .

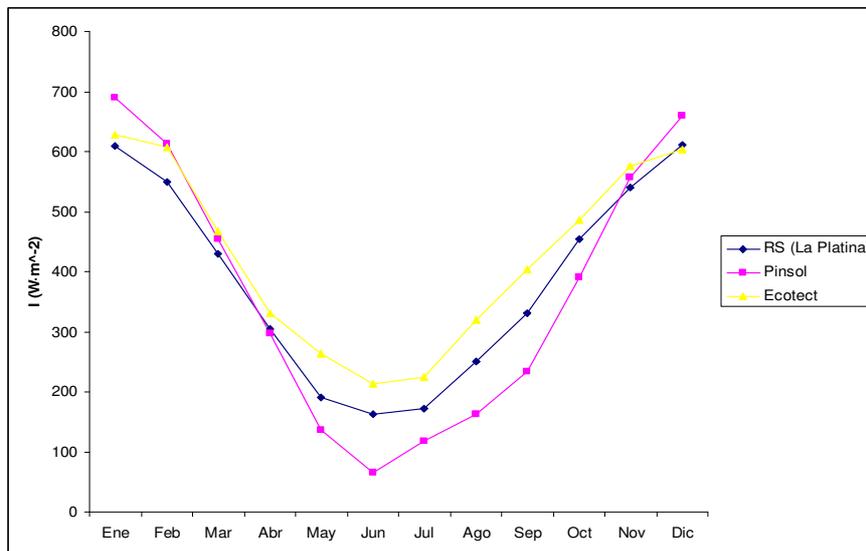


Figura 21. Medias mensuales de irradiancia global media horizontal para la estación La Platina INIA y las obtenidas de las modelaciones en el mismo sector.

## ***Comparación de los resultados de los modelos.***

### Construcción de los modelos:

Se construyó el modelo de infraestructura de Antumapu usando los programas Google Sketch Up 3D y ArcView 3.2. Estos se muestran en las Figuras 22 y 23, respectivamente.



Figura 22. Construcción del modelo en 3D Google Sketch Up.

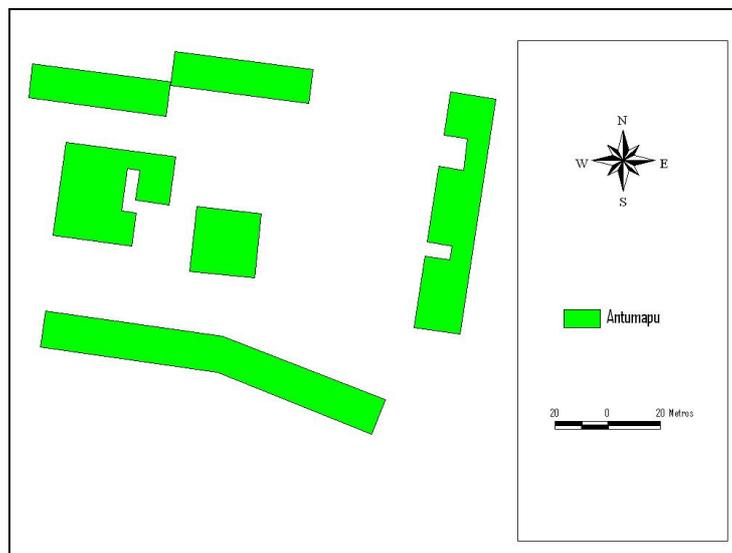


Figura 23. Modelo en formato ArcView

En la Figura 24 se encuentra el modelo de la trayectoria solar a lo largo del día y año sobre el modelo de infraestructura de Antumapu, generado con Ecotect™.

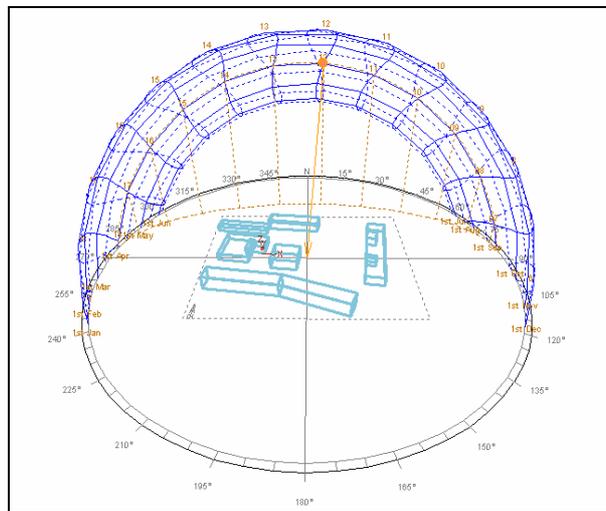


Figura 24. Modelo del movimiento solar horario y anual sobre el modelo de infraestructura de Antumapu, generado con Ecotect™.

Cielo visible en proyección estereográfica:



Figura 25. Cielo visible en proyección estereográfica – Fachada Este.

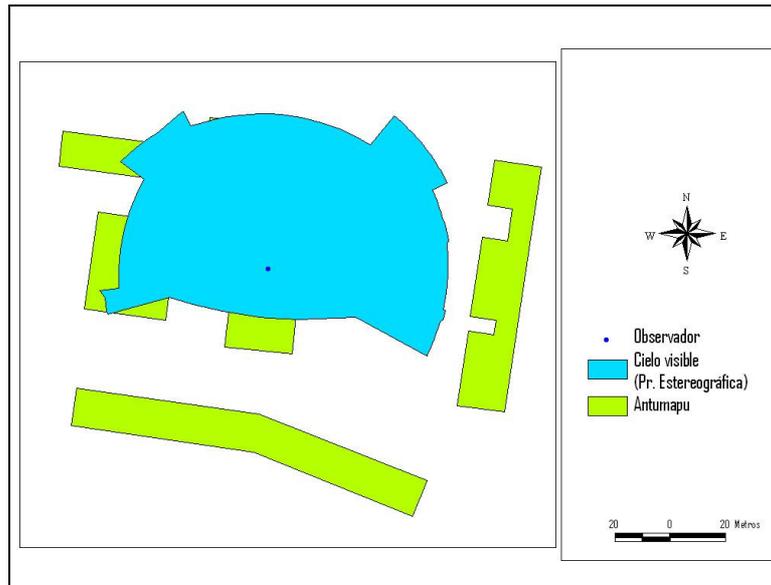


Figura 26. Cielo visible – Fachada Norte.

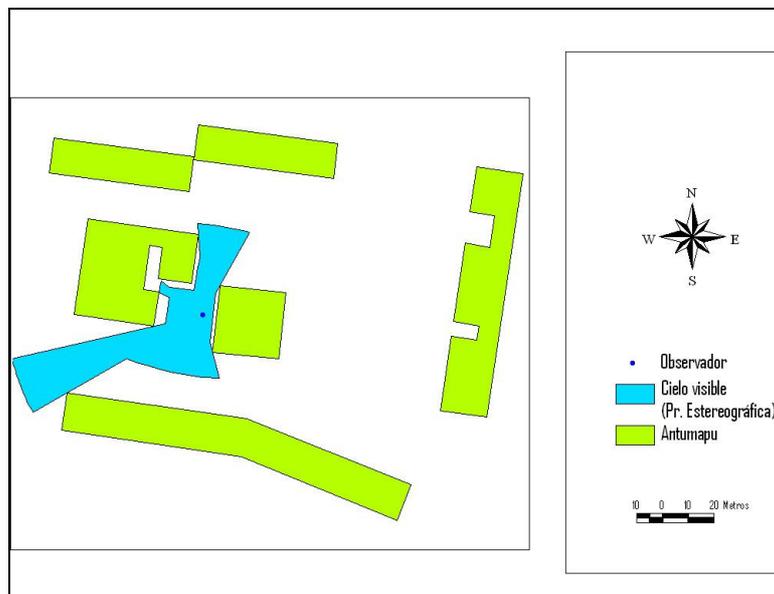


Figura 27. Cielo visible – Fachada Oeste.

Cuadro 1. Factor de Cielo Visible (SVF) para la envolvente Este, Norte, Oeste.

Envolvente	SVF
Este	0.46
Norte	0.69
Oeste	0.29
Techo	~1.00

Como se mencionó con anterioridad, la cantidad de cielo disponible es un factor determinante al momento de estimar la radiación en un entorno urbano: en las Figuras 25, 26 y 27 es posible observar el acceso a cielo visible de las orientaciones Este, Norte y Oeste. En el Cuadro 1 se muestra el factor de cielo visible para las envolventes consideradas: el Norte, cercano al 70%; la fachada Este, con un 46%; y Oeste, con 29%

de cielo disponible. Para el techo del edificio simulado, se asumió absoluta disponibilidad de cielo ( $SVF = 1$ ), dada la altura que presenta es igual o mayor a los edificios circundantes, y la fachada Sur no fue considerada en los cálculos, por presentar niveles de irradiancia despreciables respecto de las otras envolventes. Se debe destacar que el cálculo de este factor se realizó considerando solamente el entorno urbano construido (edificios), dejando al margen elementos que pueden ser determinantes en la cantidad de radiación disponible en las fachadas de las edificaciones, como la vegetación arbórea cercana a estos.

Comparación de resultados de los modelos:

El Análisis estadístico de comparación de valores predichos (Pinsol), frente a observados (Ecotect) se muestra, los resultados de la modelación Pinsol frente a los datos observados de Ecotect, para 4 envolventes, Techo, Norte, Oeste y Este en la Figura 28.

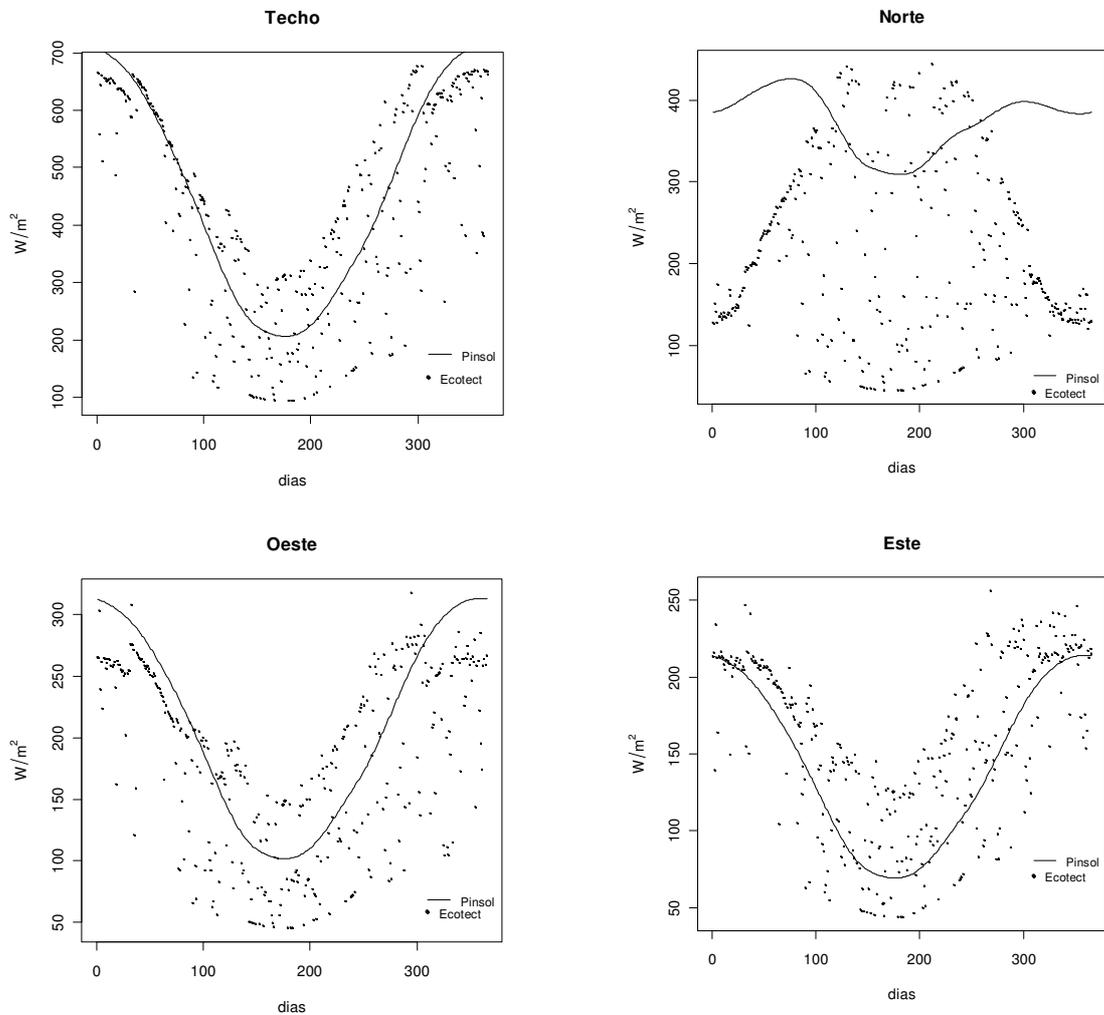


Figura 28. Serie temporal de un año de Irradiancia ( $W m^{-2} día^{-1}$ ) de modelación Pinsol y Ecotect para envolventes de Techo, Norte, Oeste y Este.

Los resultados del cálculo del índice de eficiencia del modelo Nash-Sutcliffe se pueden observar en la Figura 29 y el Cuadro 2, en los que se observa la comparación entre valores predichos y observados de Pinsol y Ecotect, respectivamente.

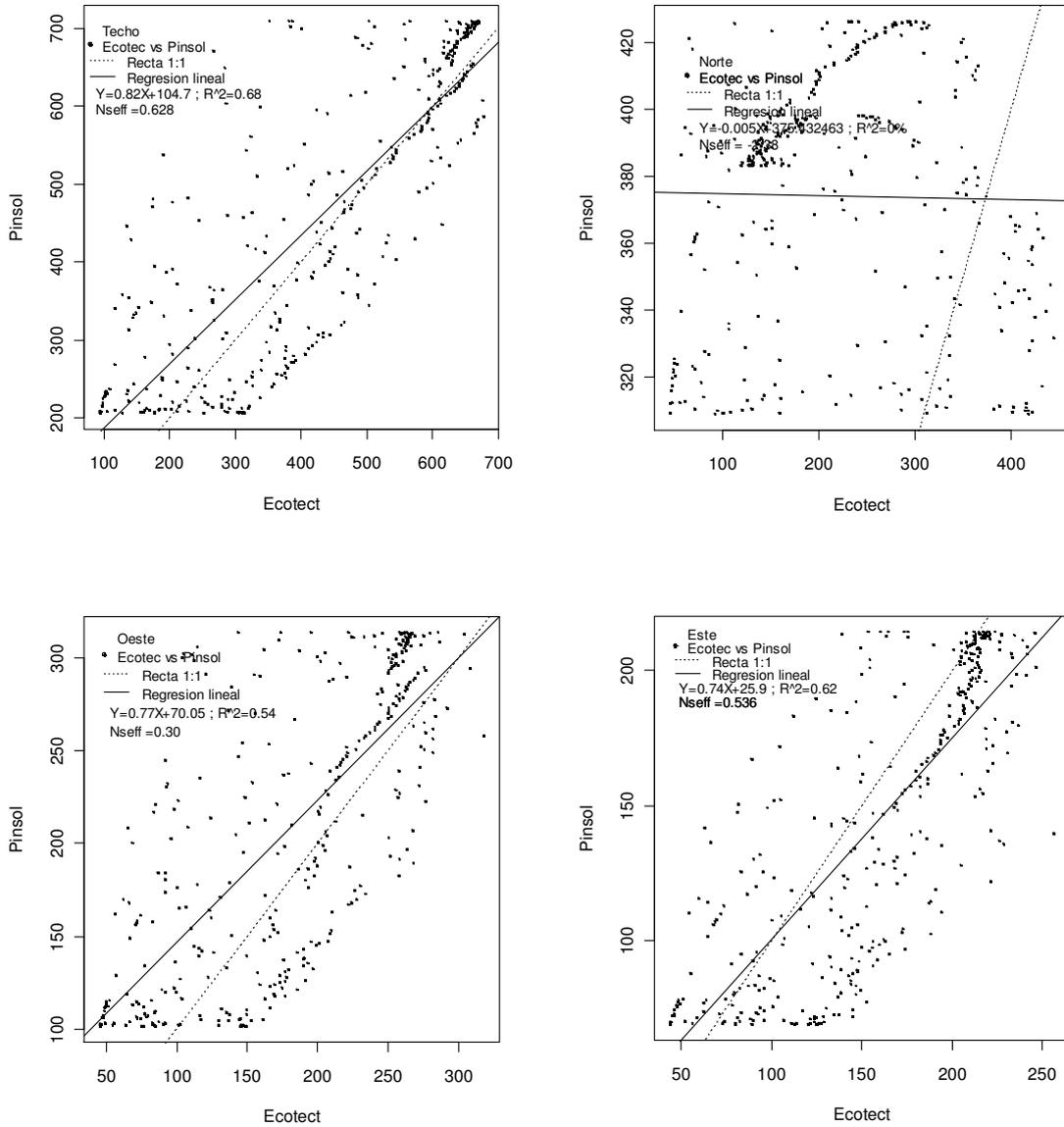


Figura 29. Comparación de modelos Pinsol y Ecotect para Irradiancia ( $W\ m^{-2}\ día^{-1}$ ) para envoltente Techo, Norte, Oeste, Este.

De los resultados obtenidos según la eficiencia del modelo (Nseff), comparando el desempeño de PINSOL respecto de los datos obtenidos con Ecotect, la mayor eficiencia se obtiene en las envolventes Techo y Este; en el caso de la fachada Oeste es poco satisfactorio, y los resultados de la envolvente Norte no tienen ninguna relación con Ecotect. El coeficiente  $R^2$  marca las mismas tendencias del índice anterior.

Cuadro 2. Comparación del modelo Pinsol y Ecotect para Irradiancia ( $W m^{-2} día^{-1}$ ) para las envolventes. Eficiencia del modelo (Nseff), coeficiente de determinación ( $R^2$ ), y pendiente e intercepto para una ajuste de regresión lineal

Envolventes	Nseff	$R^2$	Pendiente	Intercepto
Techo	0.63	0.68	0.82	104.7
Norte	-2.38	0.01	0.005	375.4
Oeste	0.30	0.54	0.77	70.05
Este	0.536	0.62	0.74	25.9

El coeficiente de determinación ( $R^2$ ) varió entre 54% y 70% en las fachadas Este, Oeste y Techo, para la fachada Norte, el coeficiente entregó un valor cercano a cero (Cuadro 2), debido al comportamiento errático de la serie de datos obtenidos mediante el modelo Ecotect. A pesar de esto, en ésta fachada se puede apreciar un comportamiento inverso a las otras: aumenta la radiación incidente en invierno y disminuye en verano, lo que puede explicarse por el ángulo de elevación del Sol en las temporadas mencionadas. Esto indicaría que en la época invernal y para la latitud del sitio estudiado, la captación sería más eficiente en un plano con exposición norte y alta pendiente. En el caso de la irradiancia teórica obtenida de la modelación con Pinsol, se observa un patrón similar, siendo éste un dato relevante al momento del diseño y/o construcción de edificaciones, o de generación de normas técnicas relativas al acceso y uso del recurso solar.

## Conclusiones

Respecto de los resultados obtenidos en este estudio, dadas las circunstancias en las que se realizó, es posible concluir que:

A partir de la base de datos meteorológicos de la DMC fue posible realizar una estimación y caracterización del comportamiento temporal de la irradiancia global sobre las fachadas de edificios en el caso planteado. De ésta base de datos además se obtuvo información meteorológica de una estación muy cercana al lugar escogido como prueba para la ejecución de los modelos, con lo que fue posible llevar a cabo comparaciones que dieran cuenta de la verosimilitud de los cálculos realizados. Asimismo, el procedimiento para calcular el factor SVF también resultó satisfactorio, pues permitió estimar el efecto de sombreado que se genera a partir del entorno construido cercano, el cual es un elemento determinante en la estimación del recurso solar disponible sobre una superficie en un medio urbano.

Por otro lado, sería recomendable realizar un análisis de la exactitud del método de estimación del factor SVF, comparándolo con otros procedimientos aplicados en la ciudad de Santiago, como el análisis de fotografías hemisféricas. También se debe considerar, como se mencionó anteriormente, que sólo se realizaron cálculos con entorno construido (edificios), omitiendo otros objetos, como la vegetación, que pueden tener una influencia muy alta. Para trabajos posteriores, debe considerarse la búsqueda de un método que incluya dicho efecto.

Los resultados obtenidos mediante el programa Ecotect dan cuenta que, al igual que cualquier otro modelo, las estimaciones realizadas son tan precisas como la información de entrada. En este caso, la base de datos presentó un alto grado de incertidumbre, por lo que parece no ser adecuada para realizar la comparación propuesta. Dado que obtener una base de datos robusta, a partir de instrumentos dispuestos adecuadamente, con el fin de comparar la simulación es prácticamente inviable, la solución a este inconveniente tiende hacia la obtención de una base de datos meteorológicos locales depurada y fiable, que sirva de entrada para los modelos utilizados, siendo esto un trabajo que debería realizarse a futuro. A pesar de este inconveniente, se pudo apreciar el comportamiento de la irradiancia solar en las fachadas de un edificio en un medio urbano simulado, observándose fenómenos interesantes, como lo es la radiación incidente en planos con exposición norte y alta pendiente, o la relevancia del factor SVF.

Es importante destacar que el presente trabajo corresponde a un estudio preliminar de la irradiancia solar global en la ciudad de Santiago, y que es recomendable la continuación y mejoramiento de la exploración del recurso solar disponible en esta región. Para esto, es necesario mejorar su prospección, tanto con modelos como con estaciones meteorológicas equipadas de instrumentos debidamente dispuestos, que permitan construir series temporales lo suficientemente extensas como para obtener comportamientos más representativos de la dinámica de la radiación global incidente en la ciudad de Santiago, que alberga a más de un tercio de la población de Chile.

## Bibliografía

Aburto, Cecilia, 2007. [En Línea] Elaboración de un Modelo de Estimación de la Distribución Espacial de la Radiación Solar Global Mensual para Chile Central. Tesis de Pregrado. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile. Disponible en WWW: [http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2007/aburto\\_c/sources/aburto\\_c.pdf](http://www.cybertesis.cl/tesis/uchile/2007/aburto_c/sources/aburto_c.pdf). Leído el 4 de Noviembre de 2009.

Angulo, Marcela, O. Coustasse, A. Dufey, C. Parra, A. Pesce, A. Ma. Ruz y P. Villarreal, 2008. [En Línea] Tendencias Tecnológicas y Oportunidades Para Chile en Energías Renovables No Convencionales, Insumos Para La Discusión. Disponible en WWW: <http://www.escenariosenergeticos.cl/wp/wp-content/uploads/2009/09/Tendencias-Tecnologicas-en-EE.RR-FCH.pdf>. Consulta: 3 de Enero de 2011.

Autodesk, 2009. [En Línea] Solar Radiation: Components. Disponible en WWW: <http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/SolarRadiation/Components>. Leído el 20 de Febrero de 2010.

Batlles, F. J., L. Zarzalejo, S. Rosiek, J. Polo, M. Martínez-Durbán, L. Ramírez, J.L. Bosch, B. Espinar y D. Pozo, 2006. [En Línea] Estimación de la Radiación Global Diaria en Zonas de Topografía Compleja Utilizando Modelos Digitales de Terreno e Imágenes de Meteosat: Comparación de los Resultados. Disponible en WWW: <http://www.ame-web.org/images/stories/Congresos/29-jornadas-Pamplona-2006/A9-trabajo%20Batlles%20et%20al.pdf>. Consulta: 27 de Diciembre de 2010.

Campbell, G. 1995. Introducción a la biofísica ambiental. Barcelona EUB. 188 p.

Cárdenas, L., S. Azar, y J. Teller, 2006. Thermal Characterization of Urban Fabric Using GIS and Townscope Modelling Tool. P. 81-88. En: Proc. of 4th European Conference on Energy Performance & Indoor Climate in Buildings (EPIC). Paris, Lyon, 20-22 de Noviembre de 2006. Local Environmental Management and Analysis (LEMA). Universidad de Lieja, Lieja, Bélgica.

Cañada, J. y Salvador, D. 1997. Radiación solar: Tablas de datos medidos en Valencia 1989-1995. Universidad Politécnica de Valencia. 186 p.

CNE, 2006. [En Línea] Plan de Seguridad Energética. Disponible en WWW: [http://www.bcn.cl/carpeta\\_temas/temas\\_portada.2006-09-07.5139377319/documentos\\_pdf.2006-09-07.4324473670/archivos\\_pdf.2006-09-07.7754288643/archivo1/baja\\_archivo..](http://www.bcn.cl/carpeta_temas/temas_portada.2006-09-07.5139377319/documentos_pdf.2006-09-07.4324473670/archivos_pdf.2006-09-07.7754288643/archivo1/baja_archivo..) Leído el 5 de Noviembre de 2009.

CNE, 2007. Concepto para la Integración de ERNC y medidas de EE en la Ciudad Parque Bicentenario.

CNE, 2008. [En Línea] Irradiancia Solar en Territorios de la República de Chile. Disponible en WWW: [http://www.labsolar.utfsm.cl/index.php?option=com\\_content&view=category&layout=blog&id=11&Itemid=11](http://www.labsolar.utfsm.cl/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=11&Itemid=11). Leído el 5 de Noviembre de 2009

Compagnon, 2004. Solar and daylight availability in the urban fabric. Energy and Buildings 36 (2004) 321 - 328.

Dirección Meteorológica de Chile (DMC), 2010. [En Línea] Región Metropolitana: Descripción Climatológica. Disponible en WWW: [http://www.meteochile.cl/climas/climas\\_region\\_metropolitana.html](http://www.meteochile.cl/climas/climas_region_metropolitana.html). Consulta: 7 de Agosto de 2010.

Fu, Pinde y Rich, Paul, 2000. [En Línea] The Solar Analyst 1.0, User Manual. Disponible en WWW: [http://www.fs.fed.us/informs/solaranalyst/solar\\_analyst\\_users\\_guide.pdf](http://www.fs.fed.us/informs/solaranalyst/solar_analyst_users_guide.pdf). Consulta: 18 de Agosto de 2010.

Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 2009. [En Línea] Energy-policy Framework Conditions for Electricity Markets and Renewable Energies: 16 Country Analyses. Disponible en WWW: <http://www.gtz.de/de/dokumente/gtz2009-en-terna-analysis-complete.pdf>. Consulta: 20 de Diciembre de 2010.

Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 2010. [En Línea] Renewables 2010 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat). Disponible en WWW: [http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21\\_GSR\\_2010\\_full\\_revised%20Sept2010.pdf](http://www.ren21.net/Portals/97/documents/GSR/REN21_GSR_2010_full_revised%20Sept2010.pdf). Consulta: 21 de Diciembre de 2010.

Iqbal, M. 1983. Introduction to Solar Radiation. Academic Press. Toronto.

Liou, K. 1980. An introduction to atmospheric radiation. Academic Press. 392 p.

Lissi, E. y Sanhueza, E. 1996. Radiación solar y fotoprocesos atmosféricos. Editorial Universidad de Santiago de Chile. 120 p.

Marsh, Andrew, 2008. [En Línea] Why Do Shading Calculations Take so Long? Disponible en WWW: <http://drajmarsh.com/articles/8>. Consulta: 21 de Febrero de 2010.

Meza, F. y Varas, E. 2000. Estimation of mean monthly solar global radiation as a function of temperature. Agricultural and Forest Meteorology. 100, 231-241 p.

Neira, F.J. 2004. Arquitectura Bioclimática. Ed. Munilla Leiria. Madrid.

Neira, Fernando, 2010. Elaboración De La Cartografía Climática De Temperaturas Y Precipitación Mediante Redes Neuronales Artificiales: Caso De Estudio En La Región Del Libertador Bernardo O'higgins. Memoria Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile, 84 p.

NREL, 2008. [En Línea] Buildings Research. Disponible en WWW: <http://www.nrel.gov/buildings/>. Leído el 12 de Noviembre de 2009.

Photowatt Technologies, 2007. [En Línea] Nociones de Energía Solar. Glosario. Disponible en WWW: <http://www.photowatt.com/es/nociones-de-energia-solar/glosario/>. Leído el Miércoles 15 de Abril de 2009.

Reuters, 2006. [En Línea] Spain requires new buildings use solar power. Disponible en WWW: <http://www.msnbc.msn.com/id/15698812>. Leído el 12 de Enero de 2009.

Robinson, 2004. Solar Radiation Modelling in the Urban Context. Solar Energy 77 (2004) 295 – 309.

Ruiz, Valeriano. 2008. Apuntes Radiación Solar. Universidad de Sevilla. Sevilla.

Sarmiento, Pedro, 2007. Energía Solar en Arquitectura y Construcción. Ril Editores. Santiago.

Sarmiento, Pedro, 1995. Energía Solar. Aplicaciones e Ingeniería. Ediciones Universitarias de la Universidad Católica de Valparaíso. Valparaíso.

Souza, C. L., D.S. Rodrigues, y J.F.G. Mendes, 2003. [En Línea] Sky View Factors Estimation Using a 3D-Gis Extension. Disponible en WWW: [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2003/BS03\\_1227\\_1234.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2003/BS03_1227_1234.pdf). Consulta: 21 de Febrero de 2010.

Stuven, H., 1968. 43 gráficos de trayectoria solar para ciudades de Chile y Argentina. Departamento de la Construcción. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad de Chile.

Tech4CDM, 2009. Proyecto La Energía Solar Térmica en Chile. Disponible en WWW: [http://tech4cdm.net/uploads/documentos/documentos\\_La\\_Solar\\_Termica\\_en\\_Chile\\_f5588ce4.pdf](http://tech4cdm.net/uploads/documentos/documentos_La_Solar_Termica_en_Chile_f5588ce4.pdf). Leído el 17 de Octubre de 2010.

Urbina, Loreto, 2007. Bases para una Estrategia de Adopción de Energía Solar Domiciliaria en la Localidad de Cochiguaz, Comuna de Paihuano, Región De Coquimbo. Memoria Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile.

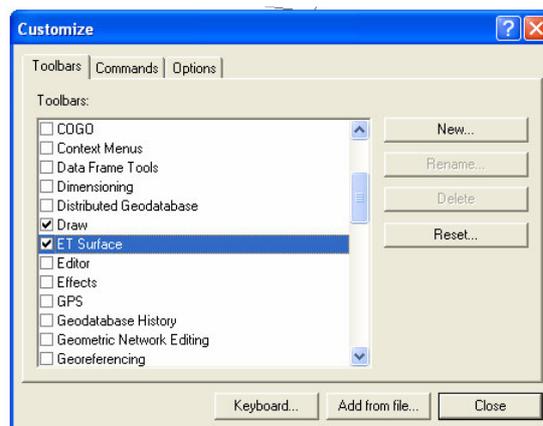
UTFSM, 2008. [En Línea] Estudio de contribución de ERNC al SIC al 2025. Informe Final. Disponible en WWW: <http://www.chilesustentable.cl/sitio/pics/publicaciones/741/Solar.pdf>. Leído el 10 de Noviembre de 2008.

Zambrano, 2010. [En Línea] Package 'hydroGOF': Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series. Disponible en WWW: [cran.r-project.org/web/packages/hydroGOF/hydroGOF.pdf](http://cran.r-project.org/web/packages/hydroGOF/hydroGOF.pdf). Leído el 10 de Enero de 2011.

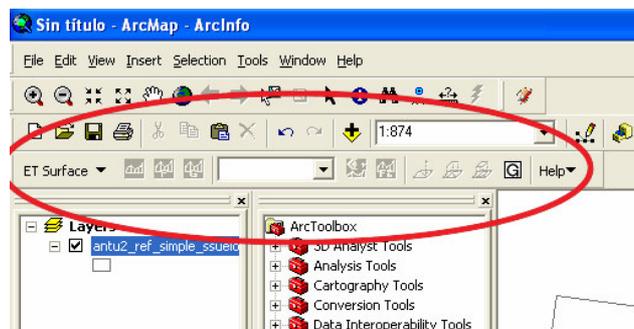
## Anexo

### Cálculo de SVF.

- 1) Instalar exportador “SketchUpPro6 GIS Plugin” según este manual:
  - [http://download.sketchup.com/downloads/markets/SketchUpPro6\\_GISPluginInstall.pdf](http://download.sketchup.com/downloads/markets/SketchUpPro6_GISPluginInstall.pdf)
- 2) Sigue los pasos de la siguiente presentación (pags. 17 – 22):
  - [http://download.sketchup.com/downloads/markets/SketchUpGIS\\_Workflow.pdf](http://download.sketchup.com/downloads/markets/SketchUpGIS_Workflow.pdf)
- 3) Una vez importado el modelo, instalar el programa “ET Surface” (para activar en ArcMap, debe seguirse el mismo procedimiento que en el plugin de Sketch Up, con la opción “Customize”).
  - <http://www.ian-ko.com/>, ET Surface (buscar la versión para ArcGis 9.2)
  - [http://www.et-st.com/et\\_surface/userguide/etsurface\\_UserGuide.htm](http://www.et-st.com/et_surface/userguide/etsurface_UserGuide.htm) (buscar la conversión “Multipatch to Polygon”)

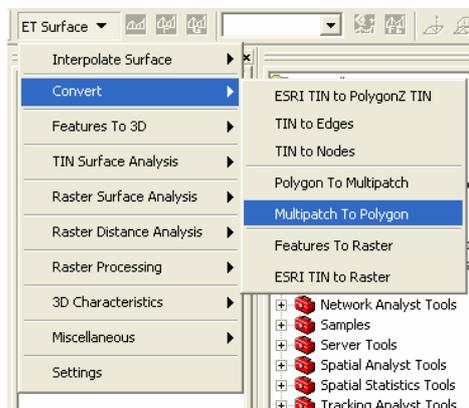


Aparecerá la siguiente barra de herramientas:

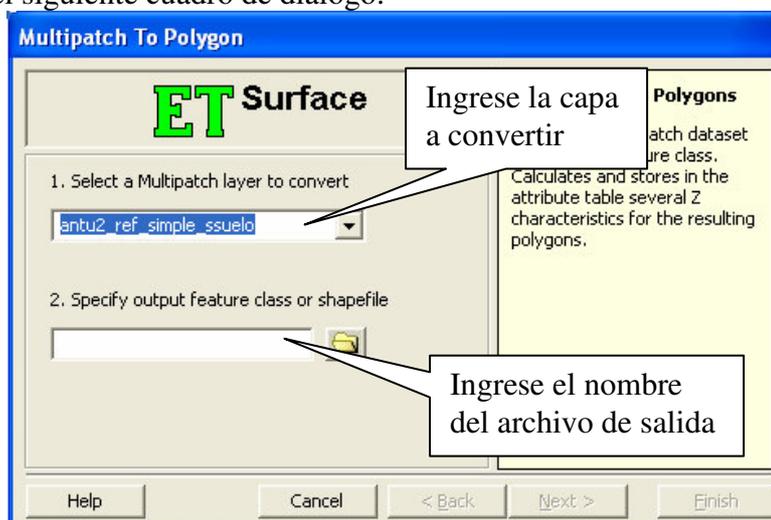


4) Agrega la capa exportada de Sketch Up (\*.mdb) con el botón .

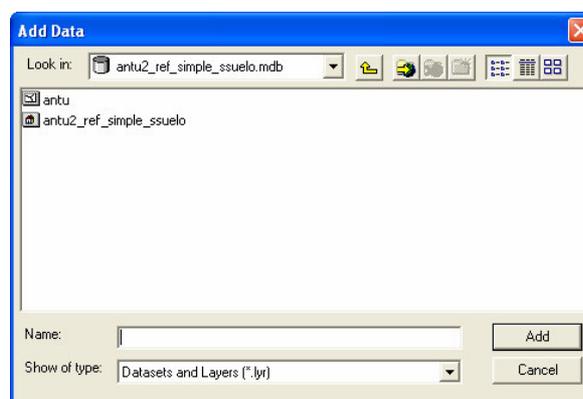
5) Abrir el menú “ET Surface / Convert / Multipatch to Polygon”:

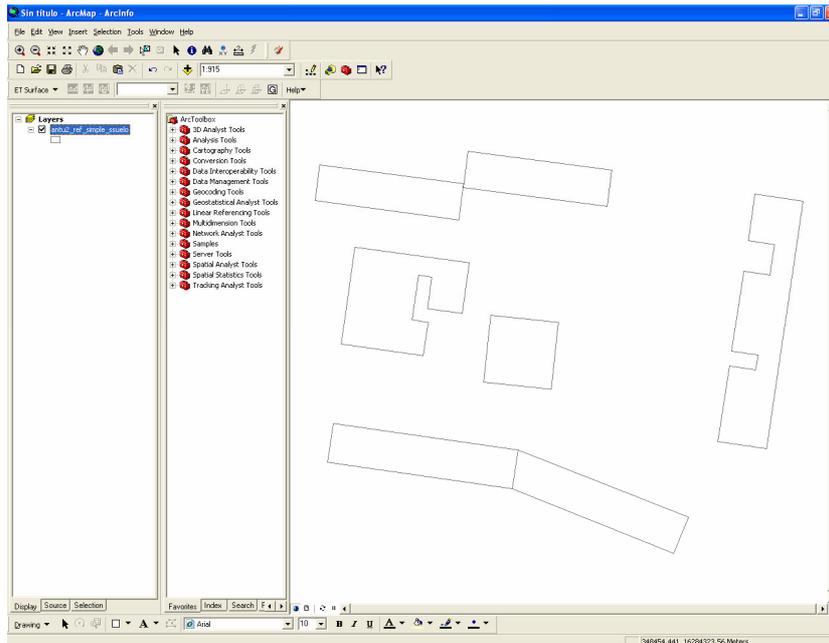


Aparecerá el siguiente cuadro de diálogo:

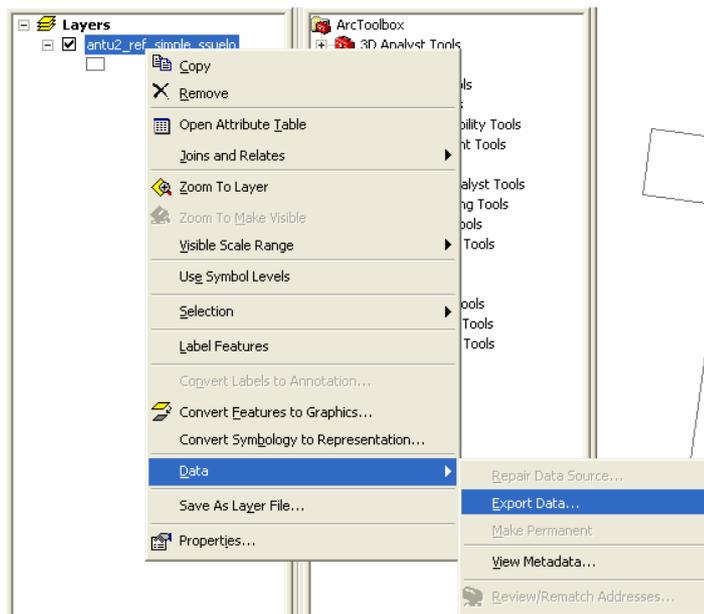


6) Rellene los campos y haz click en “Finish”. Los archivos se crearán en la carpeta indicada.

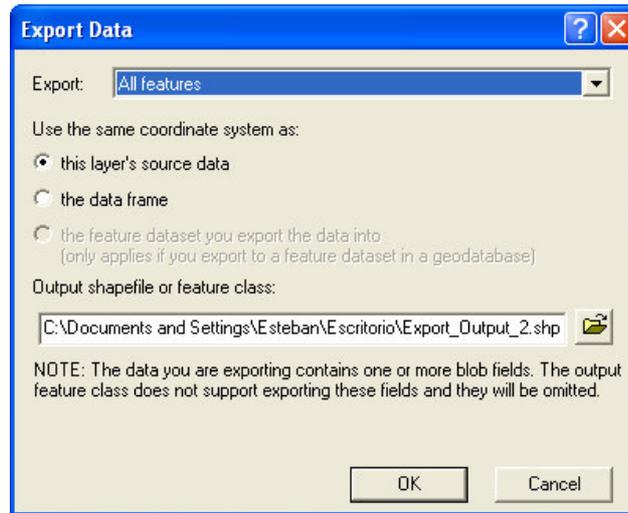
7) Agregar la capa creada (A screenshot of the 'Add Data' dialog box. The 'Look in:' field shows 'antu2\_ref\_simple\_ssuelo.mdb'. The file list contains two items: 'antu' and 'antu2\_ref\_simple\_ssuelo'. The 'Name:' field is empty, and the 'Show of type:' dropdown is set to 'Datasets and Layers (\*.lyr)'. There are 'Add' and 'Cancel' buttons at the bottom right.



8) Una vez desplegado el modelo, haz clic con el botón derecho sobre la capa en la tabla de contenidos (a la izquierda):



9) En el menú “Export Data” aparecerá el siguiente cuadro de diálogo:

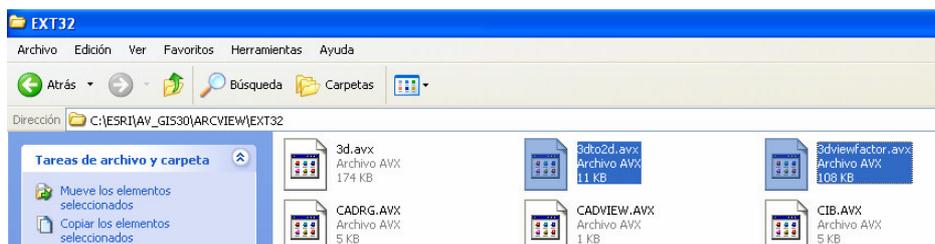


10) Haga clic en “OK”. Se generará un archivo de salida con formato “shape” (\*.shp), con el que es posible trabajar en ArcView.

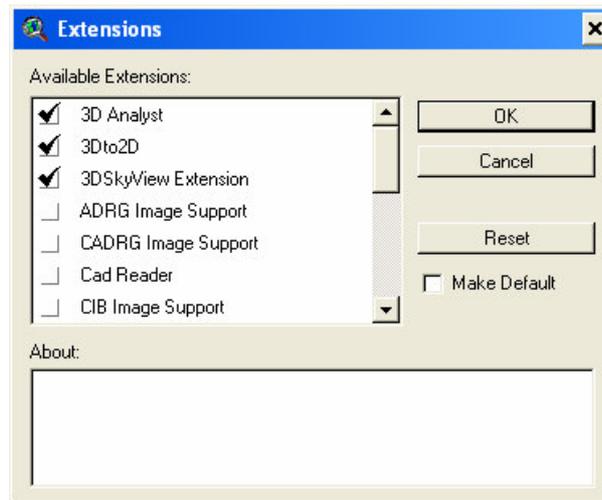
---

Para poder trabajar con la extensión “3DSkyView”, es necesario tener instalada la extensión “3D Analyst”. También es necesario convertir el modelo de formato “PolygonZ” (en 3D) a “Polygon” (2D) con la extensión “3Dto2D”.

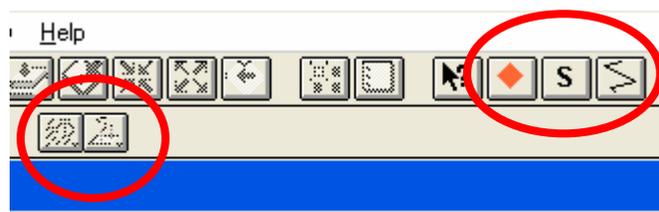
Las extensiones “3DSkyView” y “3Dto2D” no requieren programa de instalación, simplemente se copia el archivo \*.AVX en la carpeta “EXT32” del programa (por defecto, ésta tiene la siguiente ruta: C:\ESRI\AV\_GIS30\ARCVIEW\EXT32):



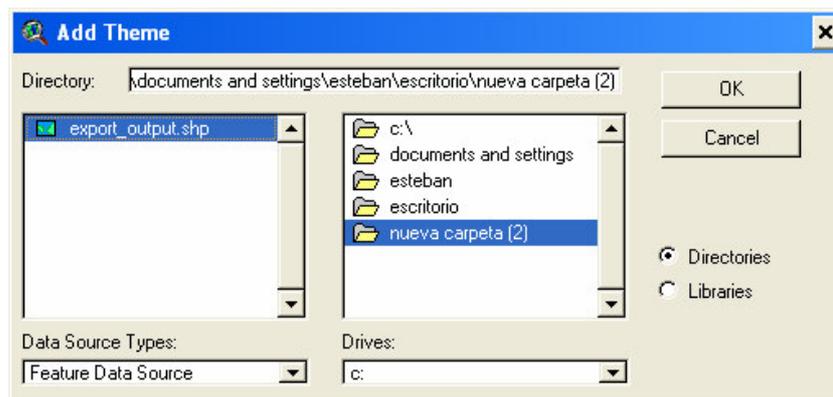
1) Activar las extensiones: abrir el menú “File / Extensions” de ArcView. Aparecerá el siguiente cuadro:

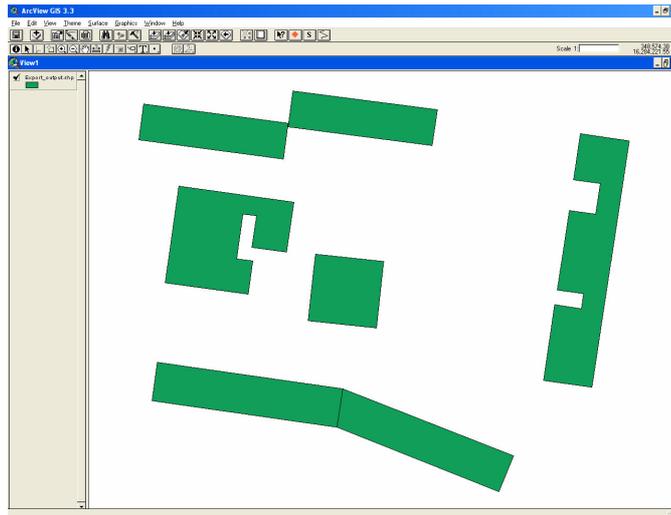


Encender las opciones “3D Analyst”, “3DSkyView” y “3Dto2D”, como aparece en la imagen anterior. Aparecerán algunos botones en la barra de herramientas.

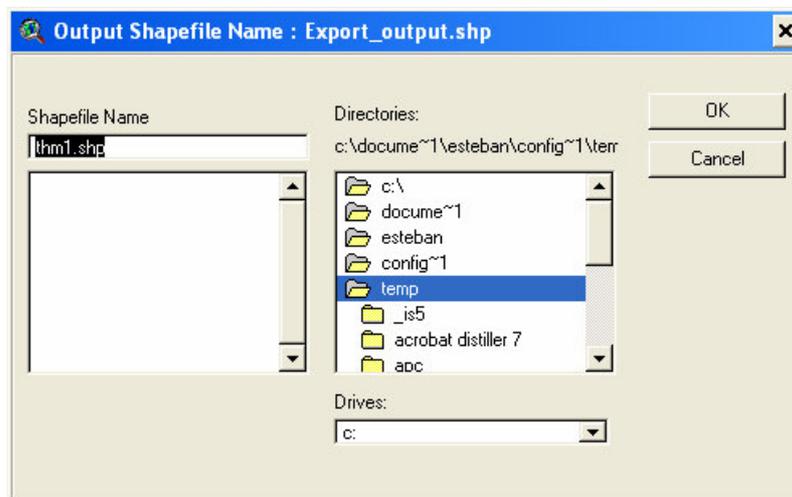


2) Agregar el modelo en formato “shape” con el botón :





Una vez desplegado el modelo, abrir el menú “PolylineZ to Polyline” con el botón . Aparecerá el siguiente cuadro:



Elegir la ruta de salida y Aceptar. El modelo ahora está en formato “Polygon”, el cual es reconocido por la extensión “3DSkyView”.

Attributes of Export_output.shp		
Shape	Objectid	Shape_leng
PolygonZ	1	135.12630923700
PolygonZ	2	36.40370271120
PolygonZ	3	187.70909352100
PolygonZ	4	11.28668085650

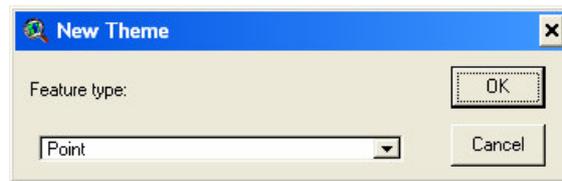
Formato “PolygonZ”

Attributes of Thm1.shp		
Shape	Objectid	Shape
Polygon	1	135.12630923700
Polygon	2	36.40370271120
Polygon	3	187.70909352100

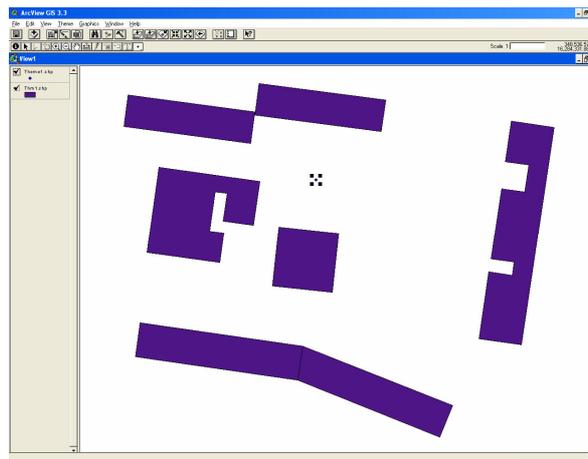
Formato “Polygon”

La extensión “3DSkyView” realiza sus cálculos a partir de dos capas: el observador (“shape” de punto) y el entorno del observador (“shape” de polígonos). Este último corresponde al modelo importado. El observador se localiza en el lugar donde se desea

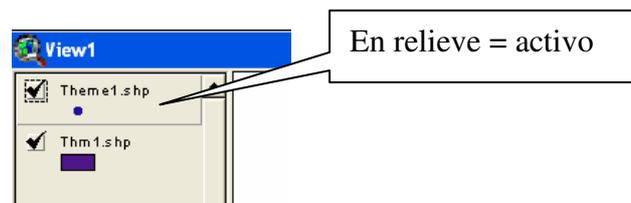
calcular el Sky View Factor (SVF). Para esto, haz clic en el menú “View/New Theme”. Aparecerá el siguiente cuadro:



Elegir “Point” y aceptar. Preguntará por la carpeta donde se creará el “shape” de punto. Ahora debe elegirse el lugar donde se desea calcular el SVF:



Haga clic donde se requiera calcular el SVF. Una vez elegida la posición del observador, debe modificarse su tabla de atributos. Debe dejarse el tema “activo” (resaltado, como aparece en la siguiente imagen:

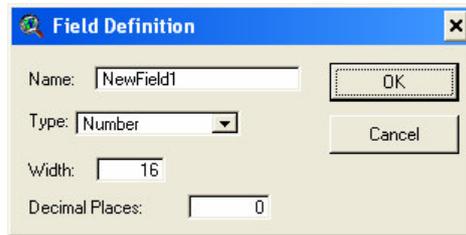


Hacer clic en el botón . Se despliega la siguiente tabla:

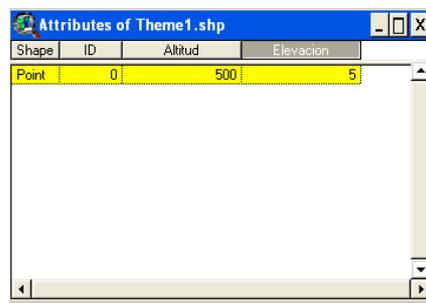
Shape	ID
Point	0

La extensión 3DSkyView requiere de dos datos: Altitud y Elevación. Es necesario crear columnas con esa información, tanto en el observador como en el modelo del entorno. Esto se ingresa haciendo clic en el menú “Edit / Add Field” (en el caso del modelo, es

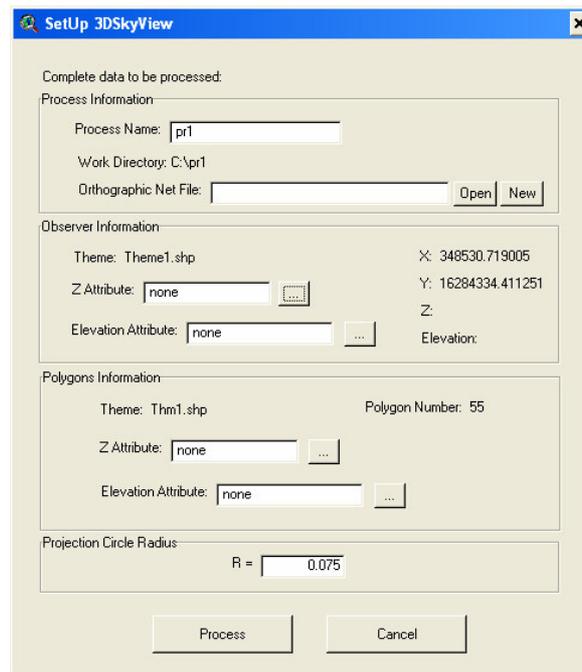
necesario modificar la tabla existente, haciendo clic en “Edit / Start editing” con la tabla de atributos abierta):



Ingresar el nombre del campo (Para mantener el orden, es conveniente nombrarlos como “Altitud” y “Elevación”). El tipo de campo es Numérico (mantener “Number”). Si se desea utilizar decimales, ingresar la cantidad de éstos a usar. Haga clic en OK.



Una vez ingresados los datos (con el botón ) , detener la edición (“Table / Stop Editing” y guardar cambios) es posible calcular el SVF, haciendo clic sobre el botón  . Las unidades del mapa deben ser explicitadas (menú “View / Properties”, metros en ambas opciones) y también deben estar activados las capas de entorno y observador (manteniendo pulsada la tecla “Shift” para activar más de una capa). Aparecerá el siguiente cuadro de diálogo:



Ingresar el nombre del “proceso” (generará una carpeta en C:\ con todos los resultados de los cálculos); el archivo de red ortográfica debe ser nuevo.

Ingresar los datos de Altitud (Z) y Elevación (Elevation) de cada capa.

La opción “Projection Circle Radius” corresponde al radio de las proyecciones a generar.

**Esta versión de la extensión presenta un problema cuando el observador se sitúa a menos de 5 metros de algún objeto del modelo.**

Una vez ingresados todos los parámetros, hacer clic en “Process”. Los resultados se generarán en la carpeta indicada.