

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

MEMORIA DE TÍTULO

ELABORACIÓN DE UN MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE
LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL MENSUAL PARA CHILE CENTRAL

CECILIA ANDREA ABURTO SCHWEITZER

SANTIAGO, CHILE

2007

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE AGRONOMÍA

ELABORACIÓN DE UN MODELO DE ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE
LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL MENSUAL PARA CHILE CENTRAL

Memoria para optar al Título Profesional de
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

CECILIA ANDREA ABURTO SCHWEITZER

PROFESORES GUÍAS	CALIFICACIONES
Sr. Luis Morales S. Físico Ph. D.	7,0
Sra. Haydeé Castillo G. Profesora Biología y Ciencias Dipl. Docencia	7,0
PROFESORES CONSEJEROS	
Sr. Andrés De La Fuente De La F. Ingeniero Agrónomo	6,5
Sr. Víctor García De Cortazar G. De C. Ingeniero Agrónomo Dr. Ing.	6,0
COLABORADOR	
Sr. Giorgio Castellaro Ingeniero Agrónomo M. Sc.	

Santiago, Chile

2007

*“Gracias cosita por tu incondicional apoyo, sincero cariño
e inolvidable compañía”*

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Después de haber invertido mi esfuerzo y dedicación en la elaboración de este proyecto de título, no quisiera dejar de lado la posibilidad de expresar mis sinceras palabras de agradecimiento a un sin fin de personas que, en mayor o menor importancia, estuvieron a mi lado en cada momento que fue necesario.

Dentro de estas personas se encuentran el señor Luis Morales y la señora Haydeé Castillo, a quienes les agradezco el haber aceptado ser parte de mi proyecto de título a través de su participación como profesores guías, proporcionándome todo su apoyo durante el transcurso de esta investigación. Además, de los señores Víctor García de Cortazar y Andrés de la Fuente quienes participaron como profesores consejeros, y el señor Giorgio Castellaro quien participó como profesor colaborador. Honestamente, les estoy agradecida a todos ustedes por su gran voluntad y buena disposición al aportar sus conocimientos para el buen desarrollo de este proyecto de título.

Quisiera extender este reconocimiento a la inconfundible labor realizada por mis grandes amigos y amigas, en especial a Antonio Opazo quien ha estado siempre a mi lado, atento a darme palabras de aliento, impulsándome a seguir adelante y aconsejándome en los momentos más oportunos. Pero, sin duda alguna, todo esto no hubiese sido posible sin el cariño y apoyo de mi querida familia, quien con su ejemplo de sacrificio, perseverancia, fe y esfuerzo se ha convertido en un pilar fundamental para mí, brindándome la oportunidad de estudiar y llegar a buen puerto en mi vida profesional. Gracias mis queridos papá, mamá, hermana y hermano, la verdad no existen palabras de agradecimiento lo suficientemente grandes para con ustedes.

Por último, y no menos importante, le doy las gracias a Dios por darme la paz y tranquilidad necesarias para afrontar aquellos momentos más difíciles, y quien finalmente me ha recompensado por el sacrificio brindado.

ÍNDICE

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
Objetivo general	11
Objetivos específicos	11
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	12
Energía solar	12
Radiación electromagnética	14
Fenómenos asociados a la radiación electromagnética	18
Radiación solar	22
Constante solar	25
Características de la Tierra	29
Efectos del movimiento de la Tierra	31
Movimiento aparente del Sol	35
Factor astronómico entre el Sol y la Tierra	37
Distancia del Sol a la Tierra	37
Declinación solar	41
Factor topográfico de la superficie terrestre	44
Visualización del relieve	45
Modelo Digitales de Elevación	48
GTOPO30	50
Relación trigonométrica entre el Sol y la Tierra	53
Posición del Sol relativa a superficies horizontales	58
Posición del Sol relativa a superficies orientadas arbitrariamente	61

Posición del Sol relativa a superficies orientadas hacia el ecuador	66
Factor atmosférico de la Tierra	69
Efectos de la atmósfera sobre la Tierra	70
Nubosidad de la atmósfera	71
Coeficiente de transparencia de la atmósfera	76
Espesor atmosférico	77
Transmisividad atmosférica	80
Cálculo de la radiación solar extraterrestre	82
Radiación solar extraterrestre sobre superficie horizontal	82
Radiación solar extraterrestre sobre superficie orientada arbitrariamente	84
Radiación solar extraterrestre sobre superficie orientada hacia el ecuador	86
Cálculo de la radiación solar global	88
Métodos directos de estimación	90
Métodos computacionales de estimación	91
Métodos empíricos de estimación	92
Aplicación mundial de los modelos	95
Información meteorológica nacional	97
MATERIALES Y MÉTODOS	99
Materiales	99
Característica geográfica de la zona de estudio	99
Característica climática de la zona de estudio	100
Información recopilada	101
Software utilizados	102
Métodos	102
Creación de una base de datos para la zona de estudio	102
Evaluación de variables que modifican la radiación solar	104
Estimación de la radiación solar en la zona de estudio	106
Representación de la radiación solar en la zona de estudio	107
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	109

Creación de una base de datos para la zona de estudio	109
Evaluación de variables que modifican la radiación solar	110
Cobertura nubosa de la atmósfera	110
Coeficiente de transparencia de la atmósfera	121
Estimación de la radiación solar en la zona de estudio	135
Representación de la radiación solar en la zona de estudio	141
 CONCLUSIONES	 154
 BIBLIOGRAFÍA	 157
 ANEXO I: INFORMACIÓN RECOPIADA A PARTIR DE LOS REGISTROS DE ESTACIONES DE MONITOREO PUBLICADOS POR ARATA Y ICAZATEGUI (1984)	 161
 ANEXO II: INFORMACIÓN RECOPIADA A PARTIR DE LOS REGISTROS DE ESTACIONES DE MONITOREO PUBLICADOS POR LA COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO Y EL CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (1997)	 164
 ANEXO III: ANÁLISIS ESTADÍSTICOS OBTENIDOS DE LA REGRESIÓN LINEAL REALIZADA PARA OBTENER LOS COEFICIENTES A Y B UTILIZADOS EN EL CÁLCULO DE LA NUBOSIDAD DE LA ATMÓSFERA	 175
 ANEXO IV: ANÁLISIS ESTADÍSTICOS OBTENIDOS DE LA REGRESIÓN LINEAL REALIZADA PARA OBTENER EL COEFICIENTE A UTILIZADO EN EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSPARENCIA DE LA ATMÓSFERA	 192
 ANEXO V: MODELO DE ESTIMACIÓN GRÁFICA DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL MEDIA MENSUAL SOBRE LA SUPERFICIE TERRESTRE DE LA ZONA CENTRAL DE CHILE	 203

RESUMEN

Con el propósito de cubrir las necesidades de herramientas capaces de entregar el comportamiento anual de la radiación solar sobre la superficie terrestre en zonas donde no se dispone con esta información precisa y detallada, se propuso elaborar un modelo de estimación de la distribución espacial de la radiación solar global media mensual para Chile central considerando la zona continental que va desde la IV Región de Coquimbo hasta la IX Región de la Araucanía. La idea principal, se centró en modificar el modelo PINSOL (United States Department of Agriculture, 2003), introduciendo los efectos que producen el estado de la atmósfera y la topografía en la disponibilidad de radiación solar global, sobre la base de mediciones realizadas en estaciones de monitoreo correspondientes a distintas localidades ubicadas dentro de la zona de estudio.

Una discusión de los datos de entrada y de los resultados obtenidos muestra las posibilidades de utilización de la rutina matemática desarrollada y adaptada. Se puede concluir que el modelo propuesto resulta ser un instrumento de gran utilidad para generar una base de datos completa que permita analizar las principales ventajas y desventajas de la zona central de Chile con respecto a la información de energía solar disponible. Además, se puede agregar que su funcionamiento es simple y accesible a todo usuario.

A partir de este método se hace posible la construcción de la cartografía que representa el comportamiento anual de la radiación solar global media mensual para la zona de estudio, junto con la variación anual de ciertos factores atmosféricos característicos de la zona central de Chile, como lo son la nubosidad y el coeficiente de transparencia, los cuales fueron considerados dentro del modelo propuesto.

Palabra clave: características climáticas de Chile, cartografía solar de Chile, disponibilidad de energía solar, factores astronómicos, factores atmosféricos, factores topográficos, factores trigonométricos, lugar de presión máxima en Chile, LPM, rutina solar.

ABSTRACT

In order to cover the need of tools capable to give the annual variation of the solar radiation over the land surface in zones where have nothing about this necessary and detailed information, is proposed to develop an estimation model of spatial distribution of the mean monthly global solar radiation in central Chile, considering the continental area including the IV Región de Coquimbo to the IX Región de la Araucanía. The main idea, is centred in modify the PINSOL model (United States Department of Agriculture, 2003) introducing the effect produced by the state of the atmosphere and topography in the availability of global solar radiation, over the base of measurements from stations located in different towns inside the study zone.

A discussion of the data entry and the results obtained show the possibility of utilization of the mathematical routine developed and adapted. It could be concluded that the proposed model can be an instrument of great utility to generate a complete data base permitting it to analyze the main advantages and disadvantages of the central zone of Chile with regard to the available information of the solar radiation. Furthermore, its working is simple and accessible to every user.

Starting from this method it is possible to develop the cartography representing the annual behaviour of the mean monthly global solar radiation in the study zone, together with the annual variation of some characteristic atmospheric factors of the central Chile zone, just as the cloudiness and the transparence coefficient, which were taken into account in of the proposed model.

Key word: astronomic factors, availability solar energy, characteristics climatical of Chile, place of maximum pressure in Chile, PMP, solar cartography of Chile, solar routine, trigonometric factors, topographic factor.

INTRODUCCIÓN

La radiación solar es considerada una de las variables de mayor importancia para los estudios y aplicaciones agroclimáticas debido a que constituye la entrada más significativa de energía en los sistemas físicos y biológicos. Como tal, condiciona una buena parte de los factores climáticos ejerciendo una fuerte influencia en la dinámica de los ecosistemas naturales. Además, hoy en día, la utilización de la radiación solar como energía alternativa se perfila como una solución al problema de la disponibilidad energética que la mayoría de las naciones han debido enfrentar de manera permanente, situación que últimamente ha ido acentuándose debido a la creciente demanda de energía.

Diversos estudios revelan que Chile es un país que presenta un alto potencial de energía solar cuya insolación promedio observada está catalogada como una de las más altas a nivel mundial. Sin embargo, para hacer posible el diseño de políticas y medidas con el fin de incentivar el uso de esta energía limpia y promover su desarrollo especialmente en zonas rurales, es necesario e indispensable cuantificar su disponibilidad así como conocer su distribución en el territorio.

Los valores medios mensuales de radiación solar en una localidad, son de un uso significativo en el diseño de los equipos que utilizan la energía solar. No obstante, y a pesar del gran interés que causa la radiación solar en las ciencias ambientales, los lugares en Chile donde se realizan mediciones de esta variable son escasos debido al costo de los equipos requeridos y al cuidado que se necesita para su mantenimiento. Por otro lado, la variabilidad topográfica y climática del territorio chileno requieren de una red de estaciones densa y bien distribuidas a nivel nacional, para que las evaluaciones de este recurso sean más precisa y detallada.

Una solución alternativa para remediar esta ausencia de información es recurrir a menudo a relaciones empíricas que ponen de manifiesto la relación entre la radiación solar global y los factores astronómicos, trigonométricos, topográficos y atmosféricos característicos de la zona de estudio, los cuales limitan en distintos grados de magnitud la disponibilidad de energía procedente

del Sol sobre la superficie terrestre de la Tierra. Sin embargo, este método de estimación de la radiación solar global está sujeto a ciertas condiciones, dentro de las cuales se considera que haya una similitud climática entre la región de origen de la fórmula empleada y el lugar de aplicación, y que los datos utilizados sean fiables. En este contexto se hace necesario contar con herramientas para la generación de datos de radiación solar en zonas que no disponen de los instrumentos de medición requeridos, recurriendo a diferentes métodos que permitan estimar esta variable en función de ciertos parámetros conocidos o de fácil medición.

Objetivo general

El objetivo general de esta memoria es elaborar un modelo de estimación de la distribución espacial de la radiación solar global media mensual, desde la IV Región de Coquimbo hasta la IX Región de la Araucanía, considerando los efectos que producen el estado de la atmósfera y la topografía.

Objetivos específicos

1. Crear una base de datos para Chile Central de las estaciones meteorológicas de referencia, la cual contenga los parámetros meteorológicos necesarios para determinar la radiación solar en la superficie terrestre.
2. Evaluar algunas variables que modifican la radiación solar que llega a la superficie terrestre.
3. Estimar a partir del modelo desarrollado la radiación solar media mensual que se recibe en la superficie terrestre.
4. Representar la distribución espacial de la radiación solar media mensual mediante un Sistema de Información Geográfico (SIG) para la zona de Chile Central.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Energía solar

Como todas las estrellas, el Sol es una gran esfera de gases incandescentes que está formada por diversas capas alrededor de su núcleo, se trata de un cuerpo completamente gaseoso, el hidrógeno constituye aproximadamente las tres cuartas partes del Sol, y el helio una cuarta parte, con otros elementos en pequeñas proporciones. La cantidad total de materia solar es pequeña comparada con la cantidad de espacio que ocupa, esto significa que la densidad global del Sol es baja, no obstante, en el núcleo la materia es tan densa que un objeto del tamaño de una nuez podría pesar más que una sandía (Iqbal, 1983).

El calor y la luz que produce el Sol provienen de la fusión nuclear, un proceso que une los núcleos de los átomos más ligeros para convertirlos en otros más pesados. Las reacciones de fusión convierten también la masa en energía. Bajo una presión que es de 200.000 millones superior a la de la superficie terrestre, en el núcleo del Sol el hidrógeno se transforma en helio mediante el proceso de fusión, convirtiendo cada segundo de tres a cuatro millones de toneladas métricas de masa en energía. El resultado neto de este proceso es que cuatro núcleos de hidrógeno se combinan para formar un núcleo de helio, y la energía surge en forma de radiaciones.

Esta es exactamente la manera en que la energía del Sol llega a la Tierra, mediante radiaciones electromagnéticas que se emiten a la velocidad de la luz y no sufren atenuación en el vacío, es así como estas radiaciones pueden atravesar el espacio interplanetario e interestelar desde las estrellas. Aunque solo una pequeña parte de radiación solar llega a la Tierra, el Sol afecta a cada uno de los aspectos de la vida en el planeta. La energía solar es responsable en primera aproximación de la meteorología, la circulación del aire y del agua, así como toda la vida en la Tierra. Menos remarcable es la ostentosa actividad ocasional del Sol, cuando partículas de origen solar cargadas con electricidad penetran en la Tierra interactuando con la atmósfera terrestre al ser

lanzadas por erupciones y vientos solares, interrumpiendo las comunicaciones y produciendo deslumbrantes auroras (Romero, 1985).

La historia cuenta que desde antes de Cristo se reconocían con gran magnitud la influencia del Sol sobre la Tierra, especialmente en la agricultura y en las condiciones climáticas, el Sol se consideraba como único dios importante venerado de manera constante, era la divinidad protectora de la casa real, su calor beneficiaba la tierra y hacía madurar las plantas. En la actualidad, el descubrimiento de ciertos vestigios tales como variadas y antiguas construcciones megalíticas ubicadas en los diversos continentes, además de calendarios e instrumentos rudimentarios para calcular el paso del tiempo y determinar el año solar, son testigos de la preocupación e importancia que el hombre le ha otorgado al comportamiento del Sol a través de los años.

Según estudios realizados a nivel mundial, tanto en Chile, como en Argentina, Australia, suroeste de Estados Unidos, norte de Africa y algunas mesetas de Asia son lugares privilegiados respecto a la radiación solar que reciben. Tal como se evidencia en la figura 1, se ha determinado que la distribución de la radiación solar anual que llega sobre estas diferentes zonas geográficas es superior a 200 [K cal cm⁻²] anual en una superficie horizontal (Sarmiento, 1995).

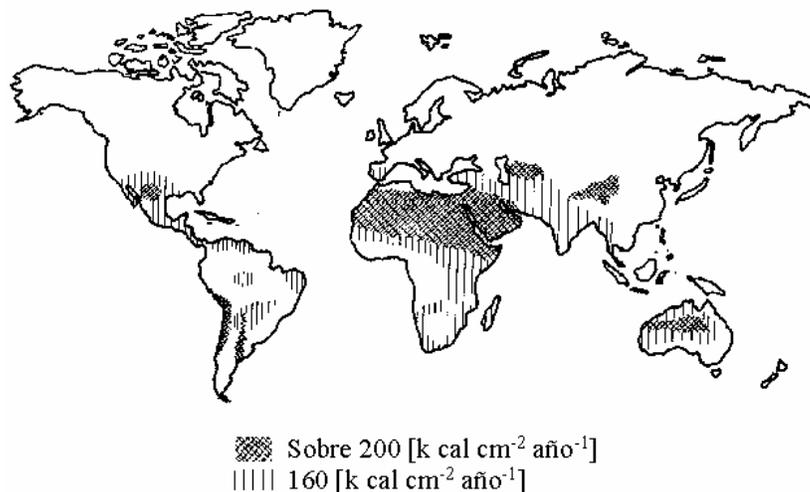


Figura 1: Distribución de la radiación solar anual en las diferentes zonas geográficas y en superficie horizontal terrestre. (Fuente: Sarmiento, 1995).

Las ventajas de la utilización y aprovechamiento de la radiación solar radican en que es una energía inagotable y en abundancia, que puede contribuir a los objetivos de seguridad de suministro y sustentabilidad ambiental de las políticas energéticas. Entre sus desventajas se destaca el hecho de que es una energía diluida e intermitente, por lo que requiere frecuentemente un sistema de acumulación. No obstante, la intensidad de radiación emanada por el Sol disponible en un tiempo y lugar determinado de la superficie terrestre depende de forma compleja pero predecible de ciertas disciplinas que varían desde conocimientos elementales de astronomía hasta las características topográficas y atmosféricas de la superficie de la Tierra (Campbell, 1995).

En la actualidad, después de 4.600 millones de años de brillar constantemente, el Sol se encuentra en la mitad de su vida y continuará brillando como hasta ahora durante otros 5.000 millones de años. Tan solo la mitad del hidrógeno de su núcleo se ha convertido en helio, esto ha cambiado poco la estructura global del Sol. Sin embargo, cuando todo el hidrógeno del núcleo haya desaparecido, el Sol envejecerá y comenzarán los cambios rápidos (Iqbal, 1983).

Radiación electromagnética

En términos generales, la radiación es el proceso de transmisión de ondas o partículas a través del espacio o de algún medio. A pesar de que las ondas y las partículas tienen muchas características comunes, la radiación suele producirse predominantemente en una de estas dos formas, de esta manera es posible encontrar distintos tipos de radiación dependiendo de su comportamiento en el espacio. Una de ellas es la radiación electromagnética que corresponde a ondas producidas por una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes, perpendiculares entre sí y a la vez perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, los cuales se propagan a través del espacio transportando energía de un lugar a otro. (Alonso y Finn, 1970).

En cualquier punto de la trayectoria de propagación de una onda se produce un desplazamiento periódico, u oscilante, alrededor de una posición de equilibrio, denominado movimiento ondulatorio. Puede ser una oscilación de moléculas de aire, como el caso del sonido que viaja por la atmósfera, de moléculas de agua, como en el caso de las olas que se forman en la

superficie del mar, o de porciones de una cuerda o un resorte. En todos estos casos, las partículas oscilan en torno a su posición de equilibrio y sólo la energía avanza de forma continua. Estas ondas se denominan mecánicas porque la energía se transmite a través de un medio material, sin ningún movimiento global del propio medio. Las únicas ondas que no requieren un medio material para su propagación son las ondas electromagnéticas; en cuyo caso las oscilaciones corresponden a variaciones en la intensidad de los campos magnéticos y eléctricos que componen a la radiación electromagnética, tal como se observa en la figura 2.

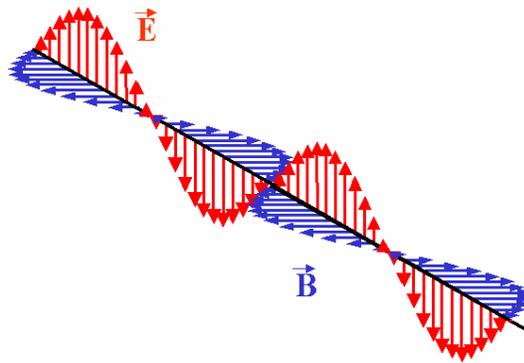


Figura 2: Representación de la radiación electromagnética donde las líneas rojas corresponden a un campo eléctrico y las líneas azules corresponden a un campo magnético. (Fuente: Alonso y Finn, 1970).

Entre los años 1864 y 1873 Maxwell refundió en sus famosas ecuaciones todas las teorías dispersas sobre electromagnetismo, demostrando la relación matemática entre los campos eléctricos y magnéticos, de donde se desprende que un campo eléctrico variante en el tiempo genera un campo magnético y viceversa, la variación temporal del campo magnético genera un campo eléctrico. A partir de esta relación es posible visualizar la radiación electromagnética como dos campos que se generan mutuamente, por esta razón la radiación electromagnética no necesita ningún medio material para propagarse. Sin embargo, la velocidad, intensidad y dirección del flujo de energía de la radiación electromagnética se ven influenciados por la presencia de materia en el medio (Maiztegui, 1958).

La radiación electromagnética se estudia a partir del tipo de frecuencia y longitud de onda que presenta. En toda clase de movimiento ondulatorio, la frecuencia de la onda suele darse

indicando el número de crestas de onda que pasan por un punto determinado cada segundo, y la longitud de onda corresponde a la distancia que se genera entre dos crestas consecutivas. La velocidad de la onda, su frecuencia y longitud de onda están relacionadas entre sí. La longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia y directamente proporcional a la velocidad. En términos matemáticos, esta relación se expresa mediante la siguiente ecuación (Ec. 1).

$$c = \lambda \cdot \nu \quad \text{Ec. 1}$$

Donde c es la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas, ν corresponde a su frecuencia de oscilación y λ es la longitud de onda. Por lo tanto, a una mayor longitud de onda, menor es la frecuencia y mayor es la velocidad. La relación matemática demostrada por Maxwell también predice la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en el vacío y su correspondiente dirección de propagación. De esto se desprende que, independientemente de su frecuencia y longitud de onda, todas las ondas electromagnéticas se desplazan en el vacío a una velocidad de 299.792 kilómetros por segundo (Campbell, 1995).

En el año 1900 Planck formuló que a veces la radiación electromagnética se comporta como si estuviera compuesta por unidades pequeñas separadas denominadas cuantos, término que actualmente es conocido como fotón. De este enunciado se desprende que, dependiendo del fenómeno estudiado, la radiación electromagnética se puede considerar como un chorro de pequeñas partículas denominadas fotones, en lugar de una serie de ondas. Esta dualidad onda corpúsculo hace que cada fotón tenga una energía proporcional a la frecuencia de la onda asociada, dada por la siguiente relación (Ec. 2).

$$E = h \cdot \nu \quad \text{Ec. 2}$$

Donde E es la energía del fotón, h es la constante de Planck que corresponde a $6,626 \cdot 10^{-34}$ Joules por segundo y ν es la frecuencia de la onda. De esta manera, a una mayor longitud de onda, menor es la frecuencia y menor es la energía del fotón. Atendiendo a su longitud de onda, es posible ordenar la radiación electromagnética dentro de una distribución que se extiende desde longitudes de onda pequeñas (onda de frecuencia muy elevadas) hasta longitudes de onda altas (onda de

frecuencia muy bajas) recibiendo diferentes nombres. El cuadro 1 describe esta distribución que se extiende desde las ondas de radiofrecuencia hasta los energéticos rayos gamma, pasando por el infrarrojo, la luz visible, los rayos ultravioleta.

Cuadro 1: Distribución del espectro electromagnético.

Espectro electromagnético		Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)	Energía (eV)
Ondas de Radiofrecuencia		$> 0,3$	$< 10^9$	$< 10^{-5}$
Microondas		$> 10^{-3}$	$< 3 \times 10^{11}$	$< 10^{-3}$
Infrarrojo	Infrarrojo lejano	$> 3,0 \times 10^{-5}$	$< 10^{12}$	$< 10^{-2}$
	Infrarrojo medio	$> 3,0 \times 10^{-6}$	$< 10^{13}$	$< 10^{-1}$
	Infrarrojo cercano	$> 7,8 \times 10^{-7}$	$< 4 \times 10^{14}$	$< 1,6$
Luz Visible	Rojo	$> 6,22 \times 10^{-7}$	$< 4,82 \times 10^{14}$	$< 1,8$
	Naranja	$> 5,97 \times 10^{-7}$	$< 5,03 \times 10^{14}$	$< 2,2$
	Amarillo	$> 5,77 \times 10^{-7}$	$< 5,20 \times 10^{14}$	$< 2,6$
	Verde	$> 4,92 \times 10^{-7}$	$< 6,10 \times 10^{14}$	$< 2,8$
	Azul	$> 4,55 \times 10^{-7}$	$< 6,59 \times 10^{14}$	$< 3,0$
Rayos Ultravioleta	Violeta	$> 3,90 \times 10^{-7}$	$< 7,69 \times 10^{14}$	$< 3,2$
	Ultravioleta A	$> 3,2 \times 10^{-7}$	$< 8 \times 10^{15}$	< 10
	Ultravioleta B	$> 2,0 \times 10^{-7}$	$< 9 \times 10^{16}$	$< 10^2$
	Ultravioleta C	$> 6,0 \times 10^{-10}$	$< 3 \times 10^{17}$	$< 2 \times 10^3$
Rayos X		$> 6 \times 10^{-12}$	$< 5 \times 10^{19}$	$< 2,4 \times 10^5$
Rayos Gamma		$< 10^{-14}$	$> 3 \times 10^{22}$	$> 10^6$

(Fuente: Alonso y Finn, 1970).

Este rango completo de longitudes de onda forma el espectro electromagnético, del cual la luz visible no es más que un minúsculo intervalo que está ubicado después de la longitud de onda correspondiente al ultravioleta y antes de la longitud de onda del infrarrojo. En cualquier caso, cada una de estas categorías son de ondas de variación de campo electromagnético. Como es posible observar, las ondas electromagnéticas cubren una amplia gama de frecuencias o de longitudes de onda y pueden clasificarse según su principal fuente. Esta clasificación no tiene límites precisos

debido a que fuentes diferentes pueden producir ondas en intervalos de frecuencia superpuestos parcialmente (Sarmiento, 1995).

En sentido estricto el término luz corresponde a oscilaciones extremadamente rápidas asociadas a radiaciones electromagnéticas cuyo rango determinado de frecuencias o longitudes de onda es capaz de captar el ojo humano a través del espectro de colores que se muestra en la figura 9. Sin embargo, técnicamente la zona del espectro de radiación electromagnética que va desde los rayos gamma hasta el ultravioleta y del infrarrojo hasta las ondas de radio también es catalogada como luz, pues la única diferencia con la luz visible es que su longitud de onda queda fuera del rango que se puede detectar con el ojo humano, simplemente son “colores” que resultan invisibles, pero que se pueden detectar mediante instrumentos específicos (Sarmiento, 1995).

Fenómenos asociados a la radiación electromagnética

La radiación es un fenómeno volumétrico y todos los sólidos, líquidos y gases pueden intercambiar energía radiante a través de fotones que son emitidos, absorbidos, transmitidos o reflejados en diversos grados por la materia como resultado de los saltos de cuantos en los niveles de energía electrónica en los átomos o de los cambios en niveles de energía vibracional o rotacional en las moléculas. Cada transición en los niveles de energía produce fotones a una sola longitud de onda. En el caso que existan muchas transiciones a niveles de energía estrechamente espaciados, estas tienden a fusionarse dentro de una banda de energía que puede ser emitida, absorbida, transmitida o reflejada (Campbell, 1995).

Si se considera la amplitud del espectro de la radiación electromagnética, es posible comprender fácilmente por qué sus diversas partes se comportan de manera diferente cuando se propagan a través de la materia. Por ejemplo, las ondas que tienen fotones de una energía comparable a las energías características de los electrones atómicos o de los átomos en las moléculas, interactúan más fuertemente con los átomos y las moléculas; este es el caso de la radiación infrarroja, luz visible y ultravioleta (Lissi y Sanhueza, 1996).

En general, la radiación de mayor longitud de onda, que lleva fotones de energía menor, interactúa débilmente con la materia por su baja capacidad de absorción, esto es lo que ocurre con las ondas de radio frecuencia. La materia también absorbe muy poco las ondas de alta energía o longitud de onda muy corta, como los rayos X y gamma, pero sus efectos son más profundos, ya que no solo producen ionización atómica y molecular, sino también en muchos casos la fragmentación del núcleo (Alonso y Finn, 1970).

Si hay un número infinito de transiciones espaciadas a través de un espectro electromagnético, el medio es un radiador o absorbedor perfecto. Tal medio se denomina “cuerpo negro” cuya principal característica es la capacidad de absorber toda la radiación que incide sobre él sin reflejar ni transmitir ninguna, para luego emitir la máxima cantidad de energía que un medio a su temperatura es capaz de radiar. En la Tierra no existe este tipo de medio, sin embargo, algunos materiales de la naturaleza se aproximan a este comportamiento pero solo en algunas partes del espectro electromagnético. Para muchos efectos prácticos el Sol se puede considerar un cuerpo negro que radia a una temperatura próxima de 6.000 grados Kelvin (Sarmiento, 1995).

La contribución de todas las longitudes de onda a la energía radiante emitida se denomina poder emisor del cuerpo, y corresponde a la cantidad de energía emitida por unidad de superficie del cuerpo y por unidad de tiempo. Un cuerpo a temperatura alta (al rojo vivo) emite la mayor parte de su radiación en las zonas de baja frecuencia (rojo e infrarrojo), en cambio, un cuerpo a temperatura más alta (al rojo blanco) emite proporcionalmente más radiación en frecuencias más altas (amarillo, verde o azul). La tasa de radiación máxima que puede emitirse desde una superficie a una temperatura absoluta, está dada por la siguiente ecuación (Ec. 3).

$$Q_{\text{emit.max}} = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde $Q_{\text{emit.max}}$ corresponde a la tasa máxima de radiación emitida por la superficie en Watts, A es el área de la superficie en metros cuadrados, T representa la temperatura de la superficie en grados Kelvin y σ es $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W m⁻² K⁻⁴] cuyo valor corresponde a la constante de Stefan y Boltzmann. La superficie idealizada que emite radiación a esta tasa máxima es el “cuerpo negro”. Sin embargo, la radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la radiación

emitida por un “cuerpo negro” a la misma temperatura y se expresa mediante la siguiente ecuación (Ec. 4).

$$Q_{\text{emit}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T_S^4 \quad \text{Ec. 4}$$

Donde Q_{emit} corresponde a la tasa de radiación emitida por la superficie en Watts, A es el área de la superficie en metros cuadrados, T representa la temperatura de la superficie en grados Kelvin y σ es $5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}]$ cuyo valor corresponde a la constante de Stefan y Boltzmann. En esta fórmula se incorpora una nueva variable representada por la letra ε que corresponde a la emisividad de la superficie, cuyo valor está dentro del intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$ considerándose como la fracción emitida por una superficie respecto a la emisión de un “cuerpo negro” a una longitud de onda dada. La propiedad de emisividad es una medida de lo cerca que una superficie se aproxima a un “cuerpo negro”, para el cual el valor de emisividad es igual a uno (Campbell, 1995).

Dependiendo de las propiedades físicas del medio en el cual se propaga la radiación electromagnética, cada longitud de onda del espectro sufre de distinta manera un cambio en su velocidad, intensidad y dirección del flujo de radiación, generando diversos fenómenos físicos y químicos. Por lo tanto, además de emitir radiación, una vez que la energía radiante incide en el medio, todas las sustancias que hay en la naturaleza son capaces de absorberla, transmitirla o reflejarla (Iqbal, 1983).

Cuando una determinada longitud de onda es reflejada durante su propagación por el espacio, esta experimenta un cambio brusco de dirección cuando incide sobre un medio con cierto ángulo de incidencia rebotando sobre este. En este caso, el ángulo que se forma entre la onda incidente y la normal al medio es igual al ángulo que forma la onda reflejada con respecto a la normal al medio. Sin embargo, durante este proceso se produce un fenómeno de absorción y transmisión diferencial en la superficie, por el cual la energía y espectro de la onda reflejada no coincide exactamente con la onda incidente (Alonso y Finn, 1970).

Para comprender estos procesos es necesario definir previamente algunos conceptos graficados en la figura 3. En primer lugar, la absorptividad α corresponde a la fracción de energía de

la radiación incidente a una longitud de onda dada que es absorbida por un material. Por otro lado, la reflectividad r corresponde a la fracción de energía de la radiación incidente a una longitud de onda dada reflejada por una superficie. En cambio, la transmisividad τ corresponde a la fracción de energía de la radiación incidente a una longitud de onda dada transmitida por un material (Sarmiento, 1995).

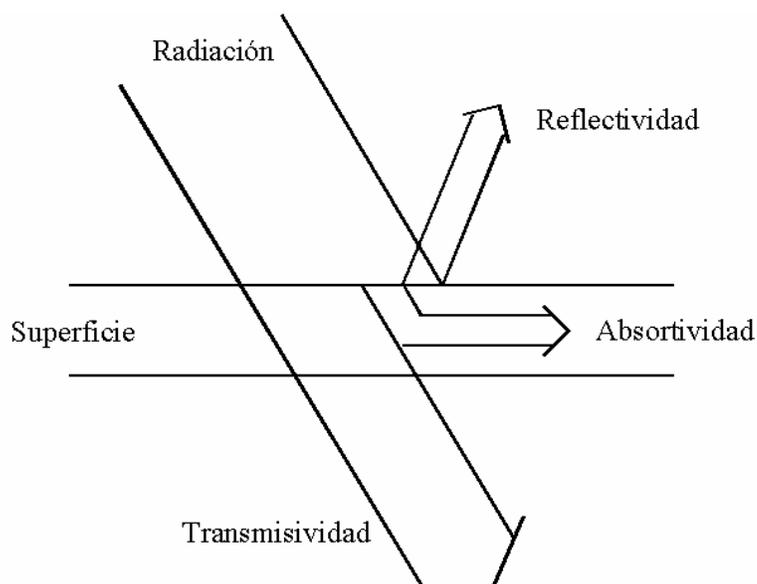


Figura 3: Procesos de transmisividad, reflectividad y absorptividad entre la radiación y el medio. (Fuente: Sarmiento, 1995).

Como toda la energía que llega al medio debe ser repartida entre una fracción absorbida, reflejada y transmitida, es posible establecer que la suma de estas tres variables es igual a uno, tal como se establece en la siguiente ecuación (Ec. 5).

$$\alpha + r + \tau = 1 \quad \text{Ec. 5}$$

Al igual que la emisividad, el valor de la absorptividad se encuentra dentro del intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$ y en el caso de un “cuerpo negro” su absorptividad es igual a uno. Por lo tanto, en este caso la reflectividad y transmisividad serían anulas, como se define en la siguiente ecuación (Ec. 6).

$$r = \tau = 0$$

Ec. 6

Por lo general, las superficies mates y rugosas absorben más energía que las superficies brillantes y pulidas, y las superficies brillantes reflejan más energía que las superficies mates. Los medios que absorben mucha radiación suelen ser buenos emisores, en cambio, los que reflejan mucha radiación y absorben poco son malos emisores. Cuando las distintas longitudes de onda del espectro electromagnético son desviadas más que otras, se produce el fenómeno que da a los objetos su color característico debido a que simple vista se pueden observar los colores del espectro de la luz visible. Las superficies blancas reflejan por igual todas las longitudes de onda correspondientes al espectro de la luz visible, en cambio, las superficies negras la absorben casi toda. Por esta razón, si a simple vista un objeto presenta un color distinto del blanco, significa que parte de las longitudes de onda del espectro de la luz visible es absorbida, mientras que otras son desviadas causando una sensación de color cuando inciden en el ojo.

Algo similar ocurre cuando la radiación electromagnética pasa a través de un bloque de vidrio, en este caso, las diferentes longitud de onda son desviados en distinta medida. Si los lados del bloque no son paralelos, como es el caso de un prisma triangular, los diferentes colores de la luz que salen del bloque se propagan con distintos ángulos, con lo que se produce una banda coloreada que corresponde al espectro de la luz visible. Este fenómeno se conoce como dispersión cromática, y se debe al hecho de que los diferentes colores de la luz visible son más o menos frenados al pasar a través del vidrio. El arco iris es un espectro natural producido por fenómenos meteorológicos, en este caso, cuando la luz del Sol incide sobre las gotas de lluvia, éstas se encargan de dispersarla en todas direcciones, saliendo de las gotas de lluvia con un ángulo de aproximadamente 138° respecto de la dirección que llevaban antes de entrar en ellas.

Radiación solar

La radiación solar corresponde a la energía radiante procedente del Sol en forma de radiación electromagnética como resultado de reacciones nucleares de fusión que tienen lugar fundamentalmente en la parte más interna o núcleo de este astro. Esta energía debe ser transferida a la superficie exterior del Sol para luego ser radiada al espacio. En este proceso de transferencia de

energía aparecen fenómenos convectivos y radiativos, así como también continuas emisiones, absorciones y reradiaciones entre las sucesivas capas de gases que forman el Sol, dando lugar a un espectro de emisión continuo que llega a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía (haz de pequeñas partículas) llamados fotones que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre (Iqbal, 1983).

No obstante, la distribución espectral de la energía del Sol que incide sobre la superficie de la Tierra varía en función de la distribución de la radiación solar en el espacio y de los constituyentes que forman la atmósfera terrestre. A partir de esto se generan dos flujos de energía radiante denominados radiación solar extraterrestre (R_e) y radiación solar global (R_g). El flujo de radiación solar que incide sobre un plano horizontal situado en el borde externo de la atmósfera terrestre es conocido como radiación solar extraterrestre (R_e). En cambio, el flujo de radiación solar que atraviesa la atmósfera terrestre e incide sobre una superficie horizontal de la Tierra es conocido como radiación solar global (R_g) (Liou, 1980).

La intensidad de radiación solar extraterrestre (R_e) que recibe la Tierra por parte del Sol varía de acuerdo a la distribución de la radiación solar en el espacio. Los ciclos de manchas solares junto con algunas actividades que se desarrollan en la superficie externa del Sol como las protuberancias, fáculas y llamaradas que ocasionalmente entran en erupción arrojando material solar al espacio y que en su mayoría son poco predecibles, producen variaciones temporales en la distribución espectral de la energía radiante del Sol en el espacio (Iqbal, 1983).

En el caso particular de las manchas solares, es posible observar que la radiación que emite el Sol decrece al mismo tiempo que aparece un gran número de manchas solares sobre la superficie externa del Sol. Contrario es lo que ocurre con las protuberancias, fáculas y llamaradas en cuyos casos la radiación que emite el Sol aumenta al mismo tiempo que se desarrollan estas actividades solares sobre la superficie externa del Sol. Sin embargo, existen ciertos factores astronómicos entre el Sol y la Tierra que producen notables variaciones en la cantidad de radiación solar extraterrestre (R_e) que recibe la Tierra a lo largo del año, dentro de los cuales se considera la distancia entre el Sol y la Tierra, el grado de inclinación del eje de la Tierra con respecto al Sol, la duración del día y la noche y la ubicación de la superficie que recibe la energía solar en el exterior de la atmósfera

terrestre. Estas variables astronómicas presentan un grado de predicción mayor que las actividades solares mencionadas anteriormente (Cañada y Salvador, 1997).

La intensidad de radiación solar global (R_g) que llega a la Tierra varía de acuerdo a ciertos factores atmosféricos relacionados con la composición de la atmósfera terrestre. Esta interacción afecta la dirección e intensidad de los rayos del Sol, generando dos nuevos flujos de energía radiante denominados radiación solar directa (R_{dir}) y radiación solar difusa (R_{dif}) tal como se muestran en la figura 4. El flujo de radiación solar global que se propaga en una dirección constante es conocido como radiación solar directa (R_{dir}). En cambio, el flujo de radiación solar global que se propaga en distintas direcciones es conocido como radiación solar difusa (R_{dif}) (Sarmiento, 1995).

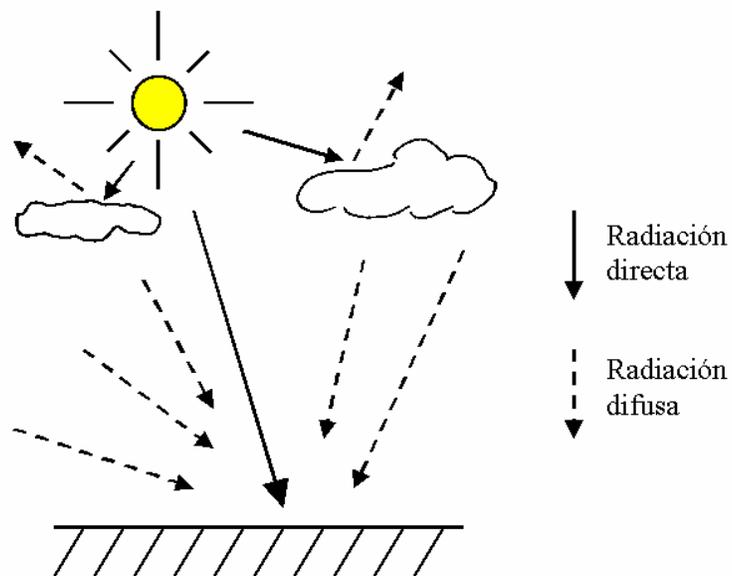


Figura 4: Radiación solar directa y difusa. (Fuente: Sarmiento, 1995).

Además, se ha comprobado que la mayor parte del calor y luz del Sol incide sobre las regiones ecuatoriales y sólo una pequeña parte va a parar a las zonas polares. Este calentamiento desigual de la superficie terrestre produce una compleja circulación de los elementos que componen la atmósfera, los cuales se desplazan desde las regiones más cálidas hacia las regiones más frías. A través del estudio de este tipo de fenómenos es posible concluir que existen ciertas variables

meteorológicas, que, junto con influir sobre los factores atmosféricos antes mencionados producen notables variaciones en la cantidad de radiación solar global (R_g) dentro de las cuales se considera la temperatura y la presión atmosférica (Romero, 1985).

Hasta el momento se ha mencionado la radiación solar que incide sobre una superficie horizontal en el borde exterior de la atmósfera terrestre y una vez que atraviesa la atmósfera terrestre. No obstante, para ciertas aplicaciones más específicas se hace necesario y fundamental considerar ciertos factores relacionados con las diversas superficies presentes en la Tierra. Si bien, la superficie terrestre presenta grandes irregularidades, es fundamental considerar que la variedad de las formas del relieve posee gran importancia, pues de ella dependen en gran medida las facilidades que una región ofrezca para el desarrollo de ciertas actividades. Además, está comprobado que la amplia variedad de altitudes, pendientes y orientaciones generan grandes contrastes topográficos que limitan la intensidad de radiación solar que incide sobre la superficie terrestre (Felicísimo, 1994).

Constante solar

La radiación emitida por el Sol y las relaciones espaciales con la Tierra conducen a una intensidad de radiación en el límite exterior de la atmósfera terrestre prácticamente constante, que es lo que se conoce como constante solar I_{sc} . Esta variable describe la intensidad máxima de energía solar en todas las longitudes de onda que por unidad de tiempo inciden sobre una superficie de área unitaria orientada perpendicularmente a la dirección de propagación de la radiación solar que está ubicada en el límite exterior de la atmósfera terrestre y cuya posición representa la distancia media anual entre el Sol y la Tierra. Cabe señalar que la distancia promedio entre el Sol y la Tierra equivale aproximadamente a 149.597.890 kilómetros, valor que es conocido comúnmente como una unidad astronómica (Liou, 1980).

Este índice de energía solar total no es una verdadera constante, sino que parece fluctuar ligeramente unas pocas décimas del porcentaje durante ciertos períodos del año, tal como se observa en la figura 5. La constante solar ha sido estudiada extensamente desde los comienzos del siglo XX, y su valor ha sido objeto de cuantiosas investigaciones. A partir de mediciones realizadas a gran

altitud, se ha demostrado que los valores de la constante solar varían desde $1.338 \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ hasta $1.368 \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ (Sarmiento, 1995).

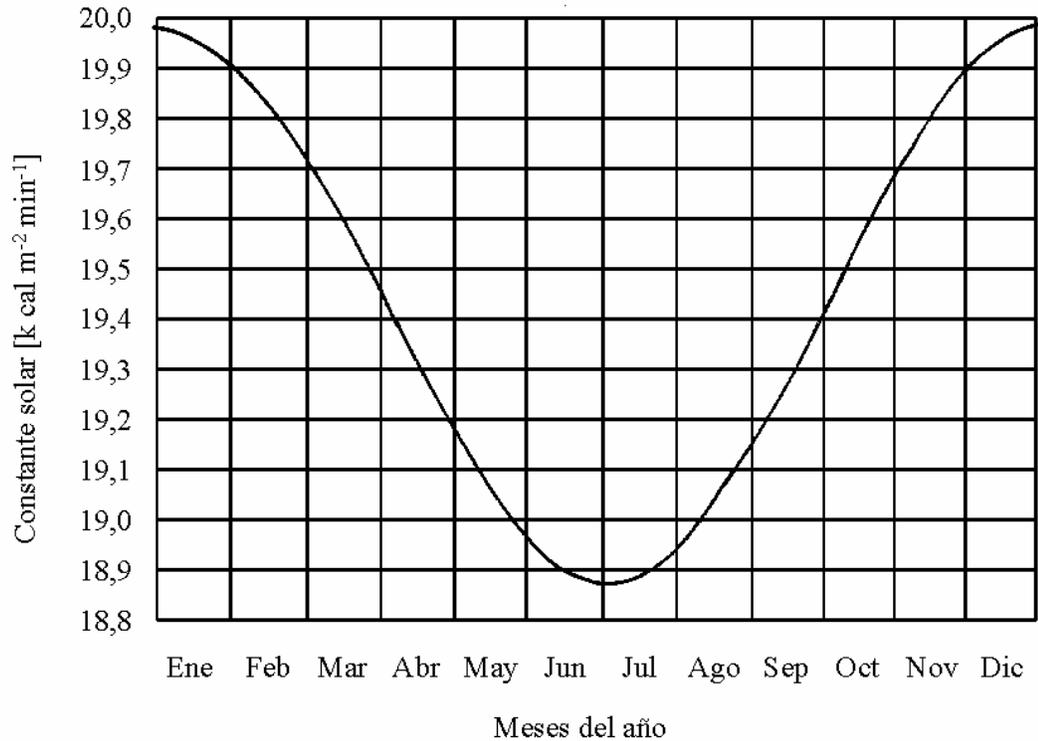


Figura 5: Variación de la constante solar según el período del año. (Fuente: Sarmiento, 1995).

En el año 1971 la NASA adoptó una intensidad de energía solar de $1.353 \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ para el valor de la constante solar, más conocido como el Standard de Diseño de la NASA (NASA Design Standard), el cual está basado en el valor promedio de numerosas mediciones realizadas a gran altitud. El error estimado para el Standard de Diseño de la NASA es de $\pm 21 \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ lo que equivale a un 1,5% de error (Liou, 1980).

Sin embargo, bajo la cooperación de la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization, WMO) se realizó una exhaustiva revisión de las mediciones que generaron el Standard de Diseño de la NASA, encontrándose una serie de diferencias en los tipos de instrumentos utilizados. En consecuencia, a través de este estudio, la Organización Meteorológica Mundial obtuvo una nueva intensidad de energía solar correspondiente a $1.367 \text{ [W m}^{-2}\text{]}$ para el

valor de la constante solar, más conocido como la Referencia Radiométrica Mundial (World Radiometric Reference, WRR) la cual está basada en el resultado de una serie de mediciones que se mantienen en el Centro de Radiación Mundial (World Radiation Center, WRC). La desviación estándar para la Referencia Radiométrica Mundial es de $\pm 1,6$ [W m^{-2}] con una desviación máxima de ± 7 [W m^{-2}] (Iqbal, 1983).

En Octubre del año 1981 la Comisión para Instrumentos y Métodos de Observación (Commission for Instruments and Methods of Observation) decidió adoptar la Referencia Radiométrica Mundial como valor de la constante solar para propósitos meteorológicos. La diferencia entre los valores de la constante solar correspondientes al Standard de Diseño de la NASA y a la Referencia Radiométrica Mundial es solamente de un 1%. En el cuadro 2 es posible apreciar las diferencias entre ambos valores de constante solar para distintas unidades de medición (De Francisco y Castillo, 1985).

Cuadro 2: Valores de la constante solar correspondiente al Standard de Diseño de la NASA y a la Referencia Radiométrica Mundial.

Standard de Diseño de la NASA	Referencia Radiométrica Mundial
1.353 [W m^{-2}]	1.367 [W m^{-2}]
1,94 [$\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$]	1,96 [$\text{cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$]
1,94 [Ly min^{-1}]	1,96 [Ly min^{-1}]
428 [$\text{Btu h}^{-1} \text{ft}^{-2}$]	433,3 [$\text{Btu h}^{-1} \text{ft}^{-2}$]
4.871 [$\text{kJ h}^{-1} \text{m}^{-2}$]	4.921 [$\text{kJ h}^{-1} \text{m}^{-2}$]

(Fuente: Iqbal, 1983).

La constante solar es sumamente importante porque representa la densidad de potencia sobre el tope de la atmósfera y con ella es posible calcular otras magnitudes relacionadas con la energía solar. No obstante, para muchos propósitos prácticos es conveniente conocer como está distribuida esta energía de acuerdo a su longitud de onda o frecuencia. En general, se suele considerar tres regiones del espectro electromagnético de la energía solar que caracterizan a la constante solar, las cuales corresponden a la región invisible antes del violeta denominada ultravioleta, la región conocida como el espectro de luz visible cuyo rango puede detectar el ojo

humano, y por último, se considera la región invisible más allá del rojo conocida como infrarrojo o región de las ondas de calor (Iqbal, 1983).

Considerando estas tres regiones del espectro electromagnético que caracterizan la distribución espectral de la constante solar, la figura 6 muestra el espectro de radiación solar extraterrestre registrado por el Centro de Radiación Mundial comparada con la radiación espectral emitida por un cuerpo negro a 5.777°K .

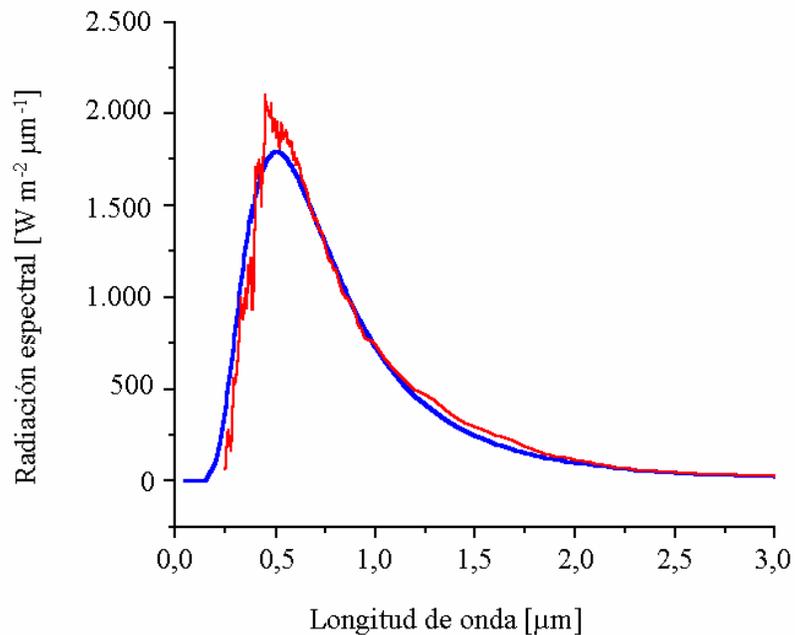


Figura 6: Espectro de radiación solar fuera de la atmósfera terrestre, donde la línea roja representa los valores de radiación solar extraterrestre registrados por el Centro de Radiación Mundial y la línea azul corresponde a los valores de radiación solar extraterrestre considerando al Sol como un cuerpo negro a 5.777°K . (Fuente: Iqbal, 1983).

De acuerdo a lo anterior, cada una de las regiones del espectro electromagnético solar señaladas anteriormente tiene asociada una fracción de la energía equivalente a la constante solar, distribuidas en un 7% para la región ultravioleta ($95,7 [\text{W m}^{-2}]$), un 47,3% para la región visible ($646,6 [\text{W m}^{-2}]$) y un 45,7% para la región del infrarrojo ($624,7 [\text{W m}^{-2}]$).

Características de la Tierra

El planeta Tierra que se observa en la figura 7 combina una serie de ventajas que no poseen los demás planetas del sistema solar. No es el mayor de los planetas, pero tampoco es el más pequeño; no es ni el más caliente ni el más frío; no es el planeta que presenta movimientos más rápidos ni más lentos; no es ni el más distante del Sol, ni el más próximo. Esta moderación de la Tierra ha facilitado el desarrollo de la vida en su superficie, junto con influir sobre la cantidad de radiación solar que llega directamente del Sol a la Tierra. Una atmósfera rica en oxígeno, temperaturas moderadas, agua abundante y una composición química variada permiten a la Tierra ser el único planeta conocido que alberga vida.



Figura 7: Fotografía tomada en 1972 por la nave espacial Apolo 17, en la cual se puede observar en la parte superior la península Arábiga, en el centro África y la mayor parte del área blanca de la base corresponde a la Antártida. (Fuente: Astromía, 2003).

La forma de la Tierra difiere ligeramente de un elipsoide de revolución, o esfera aplanada por los polos, por lo que algunos prefieren denominarla como un geoide. Algunos cálculos basados en las perturbaciones de las órbitas de los satélites artificiales lanzados al espacio revelan que el Ecuador está engrosado 21 kilómetros; el Polo Norte está dilatado 10 metros y el Polo Sur está

hundido unos 31 metros. Por lo tanto, la Tierra no es una esfera perfecta, sino más bien tiene forma de pera.

La Tierra realiza dos movimientos principales que se muestran en la figura 8, ambos efectuados en el sentido de oeste a este. Uno de ellos es el movimiento de rotación, en el cual la Tierra gira sobre si misma, en torno a un eje cuyos extremos son los polos. Este movimiento emplea 23 horas, 56 minutos y 4 segundos, es decir, cada 24 horas, aproximadamente, la Tierra completa una vuelta sobre su eje. A este movimiento se deben la sucesión de los días y las noches, mientras una mitad de la Tierra se encuentra iluminada por los rayos solares, la otra mitad está en tinieblas. Si la Tierra fuera una esfera inmóvil siempre sería día en la mitad de la Tierra situada frente al Sol y noche en la mitad opuesta al Sol, pero como la Tierra se mueve sobre si misma, en cada mitad se produce cada 24 horas un día y una noche (Sarmiento, 1995).

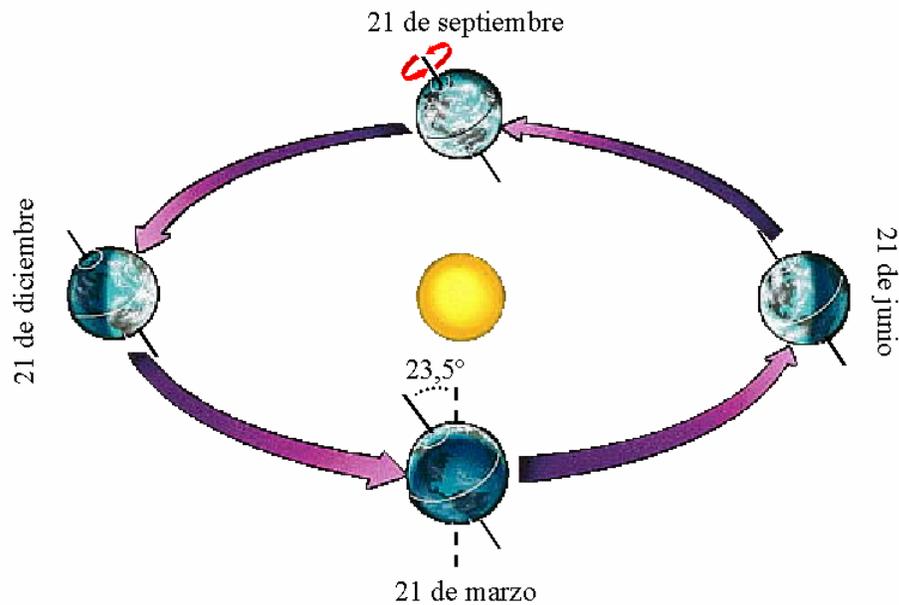


Figura 8: Movimientos de rotación (representado por la flecha de color rojo) y traslación (representado por la flecha de color lila) considerando las cuatro fechas del año que marcan los cambios de estación. (Fuente: Astromía, 2003).

El otro movimiento de la Tierra es el movimiento de traslación. Al mismo tiempo que gira sobre si misma, la Tierra se mueve alrededor del Sol, en cuyo movimiento invierte 365 días, 5 horas

y 48 minutos. En este movimiento la Tierra describe una órbita casi circular o ligeramente elíptica, llamada órbita eclíptica, lo que causa que la distancia entre la Tierra y el Sol varíe durante todo el año (Cañada y Salvador, 1997).

Hay que considerar que el eje en torno al cual gira la Tierra no se mantiene vertical al plano de la órbita terrestre, sino que presenta una inclinación de unos $23^{\circ} 27' 30''$. La inclinación del eje terrestre y el movimiento de traslación, combinados, tienen distintas consecuencias que poseen importancia geográfica, tales como la distribución desigual de la luz y el calor solar recibidos por cada región de la Tierra en el transcurso del año y la distinta duración del día y la noche en las diferentes épocas del año (Iqbal, 1983).

Gracias a esta combinación de características entre el movimiento de traslación de la Tierra y la inclinación del eje terrestre, se produce la sucesión de las estaciones del año. Mientras un hemisferio del planeta está en primavera, la otra mitad está en otoño, y mientras un hemisferio del planeta está en verano, la otra mitad está en invierno. Si la Tierra no realizara este tipo de movimiento siempre ocurriría la misma estación del año en cada hemisferio de la Tierra, pero como la Tierra se mueve alrededor del Sol, en cada hemisferio se produce cada 3 meses las estaciones de primavera, verano, otoño e invierno.

Efectos del movimiento de la Tierra

Si el eje terrestre no estuviera inclinado ligeramente hacia el Sol, cada punto de la Tierra recibiría la misma cantidad de calor y luz solar durante todo el año. Debido a la inclinación del eje de la Tierra, cada uno de los hemisferios recibe mayor cantidad de luz y calor durante unos meses y menor durante otros meses. Estas variaciones en la cantidad de luz y calor que reciben las distintas partes de la Tierra en el transcurso del año, dan lugar a las cuatro estaciones (Sarmiento, 1995).

De marzo a septiembre el Hemisferio Norte se encuentra inclinado hacia el Sol y recibe más calor y luz que el Hemisferio Sur, generándose la época de primavera y verano en el Hemisferio Norte, y la de otoño e invierno en el Hemisferio Sur. La situación cambia de septiembre a marzo, y es entonces el Hemisferio Sur el que recibe mayor cantidad de calor y luz solar, sobreviniendo la

época de primavera y verano en el Hemisferio Sur, y la de otoño e invierno en el Hemisferio Norte. Cada uno de los cambios de estación ocurre durante los solsticios y equinoccios (Cañada y Salvador, 1997).

En los solsticios los rayos solares llegan a los límites máximos que pueden alcanzar verticalmente al norte y al sur del Ecuador, tal como se evidencia en la figura 9. El solsticio de verano ocurre el 21 de junio en el Hemisferio Norte, y el 21 de diciembre en el Hemisferio Sur. En tanto, el solsticio de invierno ocurre el 21 de diciembre en el Hemisferio Norte, y el 21 de junio en el Hemisferio Sur. El 21 de junio la Tierra recibe los rayos solares con ángulo cercano a los noventa grados en el Hemisferio Norte y más oblicuos en el Hemisferio Sur. Durante esta misma fecha la Tierra en el Hemisferio Norte está iluminada más allá de los 180° de giro y el Hemisferio Sur menos de los 180° de giro, por lo que los días serán más largos en el primer caso y más cortos en el segundo (Iqbal, 1983).

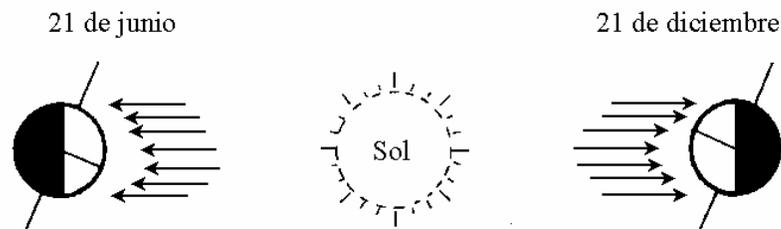


Figura 9: Dirección de los rayos solares sobre la Tierra durante los meses de junio y diciembre. (Fuente: Sarmiento, 1995).

Estos antecedentes expuestos hacen que el 21 de junio sea el día más largo, la noche más corta y el comienzo del verano en el Hemisferio Norte (solsticio de verano); en cambio, será el día más corto, la noche más larga y el comienzo del invierno en el Hemisferio Sur (solsticio de invierno). Por otro lado, el 21 de diciembre será el día más corto, la noche más larga y el comienzo del invierno en el Hemisferio Norte (solsticio de invierno); en cambio, será el día más largo, la noche más corta y el comienzo del verano en el Hemisferio Sur (solsticio de verano).

En cada uno de los hemisferios existen los trópicos, que señalan los límites máximos en los que el Sol puede ocupar la vertical del lugar al mediodía. En el Hemisferio Norte, el Trópico de

Cáncer (situado a una latitud de $23^{\circ} 27'$ al norte del Ecuador) delimita los puntos más septentrionales donde los rayos del Sol inciden verticalmente sobre la Tierra, al mediodía, un día al año, es decir, hacia el 21 de junio. En cambio, en el Hemisferio Sur, el Trópico de Capricornio (situado a una latitud de $23^{\circ} 27'$ al sur del Ecuador) delimita los puntos más meridionales donde los rayos del Sol inciden verticalmente sobre la Tierra, al mediodía, un día al año, es decir, hacia el 21 de diciembre.

En los equinoccios los rayos solares caen verticalmente sobre el Ecuador y con un cierto ángulo al norte y al sur del Ecuador, tal como se evidencia en la figura 10. Esto provoca que las áreas ubicadas más al norte y más al sur del Ecuador reciban menos calor, puesto que la radiación solar se extiende sobre una zona más grande. El equinoccio de otoño ocurre el 21 de septiembre en el Hemisferio Norte, y el 21 de marzo en el Hemisferio Sur. En tanto, el equinoccio de primavera ocurre el 21 de marzo en el Hemisferio Norte, y el 21 de septiembre en el Hemisferio Sur. El 21 de septiembre y el 21 de marzo los rayos solares llegan perpendiculares al eje de giro de la Tierra, por lo que el día y la noche correspondiente a estas mismas fechas serán de igual duración en todo el planeta, es decir, 12 horas de día y 12 horas de noche en ambos hemisferios (Iqbal, 1983).

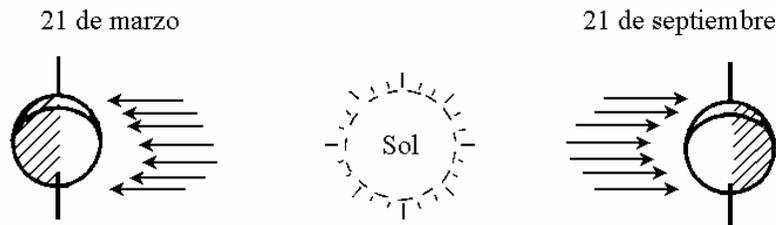


Figura 10: Dirección de los rayos solares sobre la Tierra durante los meses de marzo y septiembre. (Fuente: Sarmiento, 1995).

Estos antecedentes expuestos hacen que el 21 de septiembre sea el comienzo del otoño en el Hemisferio Norte (equinoccio de otoño) y el comienzo de la primavera en el Hemisferio Sur (equinoccio de primavera). Por otro lado, el 21 de marzo será el comienzo de la primavera en el Hemisferio Norte (equinoccio de primavera) y el comienzo del otoño en el Hemisferio Sur (equinoccio de otoño).

Debido a la inclinación del eje terrestre, la trayectoria del Sol que se observa en la Tierra varía según cada latitud. Esta situación genera un fenómeno muy sorprendente que ocurre en las altas latitudes de la Tierra. En cada uno de los hemisferios, las regiones por encima de los $66,5^\circ$ de latitud tienen al menos una noche sin puesta de Sol cada verano y un día sin salida de Sol cada invierno. Esta región delimitada por los círculos polares correspondientes a cada uno de los hemisferios de la Tierra, es conocida como la región del "Sol de medianoche" la cual presenta una trayectoria solar muy particular. Durante el solsticio de verano el Sol se mueve en círculos paralelos al horizonte pero $23,5^\circ$ por encima. Durante los dos equinoccios se mueve en círculos sobre el horizonte mismo. Durante el solsticio de invierno el Sol desaparece hasta llegar a describir una trayectoria circular de $23,5^\circ$ por debajo del horizonte.

Según estos antecedentes se puede concluir que la región del "Sol de medianoche" se mueve en círculo cuando la Tierra gira sobre su eje, pero el círculo es tan pequeño que durante el solsticio de verano tales lugares nunca dejan de estar expuestos a la luz del Sol. Por lo tanto, cuando ocurre la puesta de Sol el astro parece caer hacia el horizonte, pero continua visible durante toda la noche. Sin embargo, durante el solsticio de invierno tales lugares están constantemente sin la presencia del Sol. En la figura 11 y en la figura 12 es posible observar cada una de estas situaciones por separado.

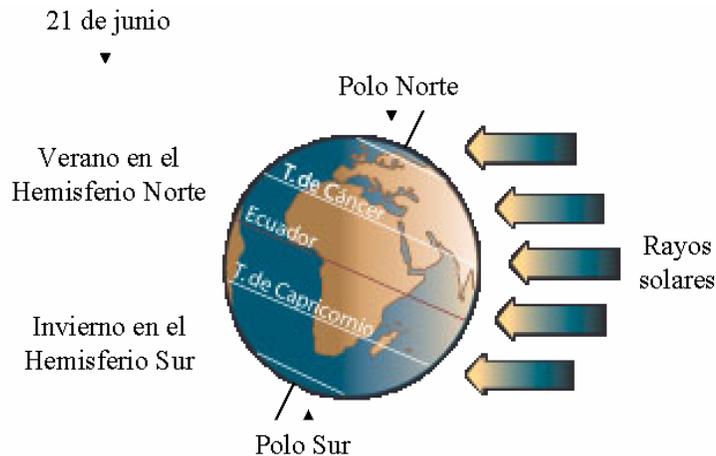


Figura 11: Fenómeno que ocurre en los respectivos círculos polares durante el 21 de junio. (Fuente: Astromía, 2003).

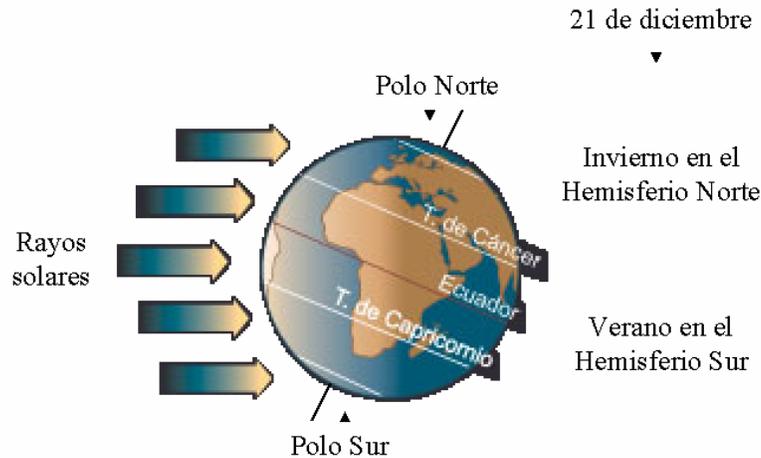


Figura 12: Fenómeno que ocurre en los respectivos círculos polares durante el 21 de diciembre. (Fuente: Astromía, 2003).

En el Hemisferio Norte, el Círculo Polar Ártico (situado a una latitud de $66^{\circ} 33'$ al norte del Ecuador) señala el límite meridional del área en la que el Sol no se pone en el horizonte hacia el 21 de junio y no llega a salir hacia el 21 de diciembre. Desde este círculo y hacia el norte, el número de días sin Sol durante la estación invernal se va incrementando hasta el Polo Norte, donde se suceden seis meses seguidos de oscuridad y otros seis de luz diurna. En cambio, en el Hemisferio Sur, el Círculo Polar Antártico (situado a una latitud de $66^{\circ} 33'$ al sur del Ecuador) señala el límite septentrional del área donde hacia el 21 de diciembre no se pone el Sol en el horizonte y hacia el 21 de junio no llega a salir. Desde este círculo y hacia el sur, el número de días sin Sol durante la estación invernal se va incrementando hasta el Polo Sur, donde se suceden seis meses continuos de oscuridad y otros seis de luz diurna.

Movimiento aparente del Sol

No cabe la menor duda que existe un movimiento relativo de la Tierra respecto de los astros que la rodean, sin embargo, un observador ubicado en la superficie de la Tierra percibe un movimiento completamente distinto. La percepción que tiene un observador desde cualquier punto de la esfera terrestre cuando mira hacia el cielo es la sensación de encontrarse rodeado por una bóveda sobre la cual están situados una innumerable cantidad de astros. De esta manera, pareciera

que el observador es el ente fijo alrededor del cual se percibe el movimiento de estos astros (Sarmiento, 1995).

Si se observa detalladamente durante varias noches la trayectoria de los astros sobre el cielo, se podrá comprobar que cada uno de los astros luminosos que rodean la Tierra aparece siempre por el mismo punto del horizonte y desaparecen por otro punto idéntico al que se observó durante la noche anterior. También es cierto que todos estos astros describen trayectorias circulares paralelas, aunque no es fácil de observar (Cañada y Salvador, 1997).

En astronomía, la posición de los astros en el cielo se describe en términos de una esfera imaginaria denominada esfera celeste, en donde se supone que están situadas las estrellas y otros objetos celestes, sin tener en cuenta sus verdaderas distancias a la Tierra. A partir de esta explicación, el movimiento aparente del Sol en el cielo se puede describir para un observador en cualquier punto de la superficie terrestre mediante el trazado de esta esfera cuyo centro está ocupado por la Tierra, tal como se observa en la figura 13 (Sarmiento, 1995).

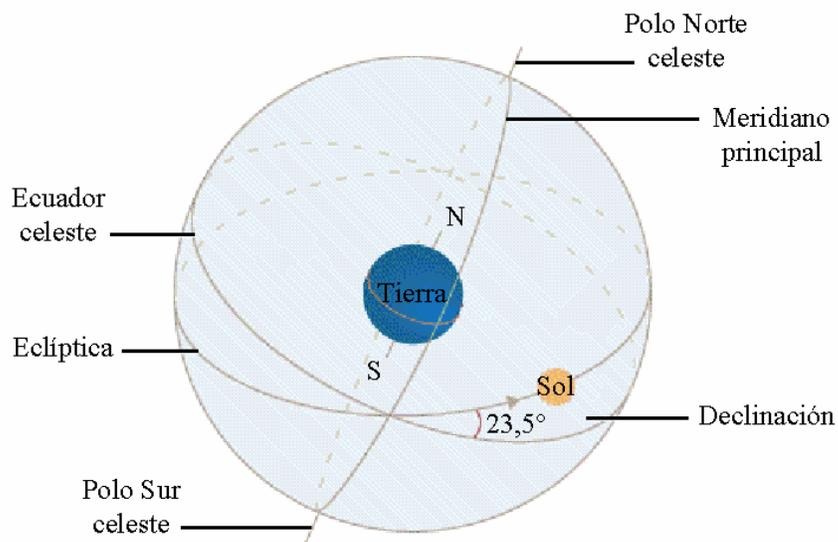


Figura 13: Esfera celeste. (Fuente: Astromía, 2003).

La esfera celeste es la base de un sistema de coordenadas astronómicas que se utiliza para asignar posiciones a los objetos observados en el cielo. No obstante, para determinar la ubicación

correspondiente a cada objeto, es necesario utilizar un sistema cuadrulado de puntos y líneas como referencia básica, similar al utilizado en la cartografía terrestre, proyectado de forma tal que haya una correspondencia del ecuador y los polos de la Tierra con el ecuador y los polos de la esfera celeste (Cañada y Salvador, 1997).

En este caso, los polos celestes son los puntos que corresponden a la prolongación del eje terrestre, el cual produce un corte en la esfera celeste. Similarmente, el ecuador celeste es una proyección externa del plano ecuatorial terrestre en la esfera celeste. Además el horizonte celeste está formado por un plano paralelo al horizonte que puede ver el observador desde la superficie terrestre y que pasa por el centro de la Tierra. Estas referencias básicas generan planos que atraviesan el centro de la Tierra en una u otra dirección y se extienden hasta la esfera celeste (Iqbal, 1983).

Factor astronómico entre el Sol y la Tierra

Si bien, la radiación solar atraviesa el espacio interplanetario e interestelar desde el Sol hasta llegar a la Tierra, la intensidad de esta energía varía notablemente durante su recorrido por el espacio. A raíz de esto se han establecido ciertos factores astronómicos entre el Sol y la Tierra que pueden predecir con bastante precisión el cambio en la cantidad de radiación solar sobre la superficie terrestre. De esta manera, dentro de la relación astronómica que existe entre el Sol y la Tierra se consideran el movimiento de la Tierra alrededor del Sol, el movimiento de la Tierra alrededor de su eje polar, y el ángulo entre el ecuador terrestre y el plano que contienen el sistema orbital Sol y Tierra.

Distancia del Sol a la Tierra

Matemáticamente se sabe que la intensidad de energía que llega a un área determinada es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia recorrida por dicha energía. En el caso particular de la energía solar, la cantidad de radiación solar que llega a la Tierra será inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que existe entre el Sol y la Tierra, es decir, mientras mayor

sea la distancia entre estos dos cuerpos, menor será la cantidad de radiación solar que llegue a la Tierra. Por lo tanto, conocer el valor exacto de la distancia del Sol a la Tierra con considerable precisión es un tema de suma importancia cuando se requiere averiguar la disponibilidad de energía solar en algún lugar determinado de la superficie de la Tierra (Sarmiento, 1995).

Anualmente la Tierra gira alrededor del Sol describiendo una trayectoria elíptica que dura aproximadamente 365 días. Sin embargo, dentro de esta órbita conocida como eclíptica, el astro solar no se ubica en su centro, sino que se encuentra desplazado hacia uno de los extremos de dicha órbita. Esta particular posición del Sol con respecto a la órbita que describe la Tierra durante su movimiento de traslación permite concluir que la distancia entre el Sol y la Tierra (r) es variable a lo largo del año (Cañada y Salvador, 1997).

Si bien, se sabe que la distancia media entre el Sol y la Tierra (r_0) abarca precisamente 149.597.890 kilómetros, por lo general se utiliza una unidad de medida mucho más pequeña denominada Unidad Astronómica (Astronomical Unit, [AU]). Esta nueva unidad de medida establece el valor de la distancia media entre el Sol y la Tierra en 1 Unidad Astronómica (One Astronomical Unit, 1 [AU]), tal como lo señala la siguiente ecuación (Ec. 7) (Iqbal, 1983).

$$1(\text{AU}) = 1,496 \cdot 10^8 (\text{km}) \quad \text{Ec. 7}$$

Según la unidad de medida conocida como Unidad Astronómica (Astronomical Unit, [AU]), la distancia mínima entre el Sol y la Tierra equivale aproximadamente a 0,983 [AU], este punto de la órbita terrestre en el cual la Tierra se encuentra más cerca del Sol se denomina perihelio y ocurre alrededor del 3 de enero. En cambio, la distancia máxima entre el Sol y la Tierra corresponde aproximadamente a 1,017 [AU], este punto de la órbita terrestre en el cual la Tierra ocupa la posición más lejana al Sol se denomina afelio y ocurre alrededor del 4 de julio. Por otro lado, el punto de la órbita terrestre en el cual la Tierra se encuentra en su distancia media con respecto al Sol se produce aproximadamente los días 4 de Abril y 5 de Octubre (Iqbal, 1983).

A largo plazo, cada una de estas distancias se encuentran ligeramente influenciadas por la gran variedad de cuerpos celestes que viajan a través del espacio y por los ciclos de los años

bisiestos, no obstante, la distancia entre el Sol y la Tierra para cualquier día de cualquier año es conocida con considerable precisión. A través de la figura 14 es posible apreciar cada una de las posiciones que representan las distancias entre el Sol y la Tierra mencionadas anteriormente.

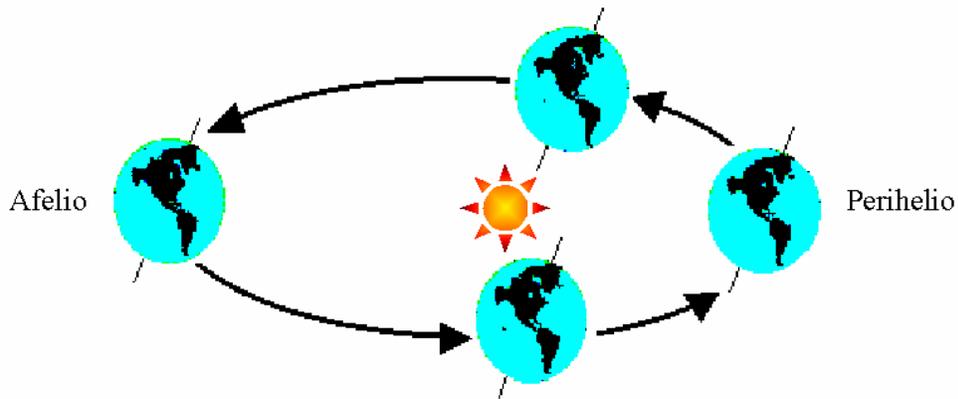


Figura 14: Distancia entre el Sol y la Tierra. (Fuente: Cañada y Salvador, 1997).

Si bien, es bastante conveniente tener los valores de la distancia del Sol a la Tierra expresada a través de una simple fórmula matemática, para este propósito está disponible un gran número de expresiones matemáticas de variada complejidad. Tradicionalmente la distancia entre el Sol y la Tierra ha sido expresada en términos de un tipo de Serie de Fourier de expansión con un determinado número de coeficientes. Con un error máximo de 0,0001 Spencer (1971, citado por Iqbal, 1983) desarrolló la siguiente expresión (Ec. 8 y Ec. 9) para el recíproco del cuadrado del radio vector de la Tierra, más conocido como el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre (E_0).

$$E_0 = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \quad \text{Ec. 8}$$

$$E_0 = 1,000110 + 0,034221 \cdot \cos \Gamma + 0,001280 \cdot \sin \Gamma + 0,000719 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000077 \cdot \sin 2\Gamma \quad \text{Ec. 9}$$

Este factor de corrección para la posición de la Tierra en su órbita determina la distancia entre el Sol y la Tierra en unidades astronómicas. En tanto, la variable Γ es denominada como el día angular en radianes, y se obtiene a través de la siguiente expresión (Ec. 10).

$$\Gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot (d_n - 1)}{365} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde d_n representa el día juliano del año, es decir, se trata de una ordenación ordinaria de los días del año asignando como d_n igual a 1 al 1° de Enero, d_n igual a 32 al 1° de Febrero, y así sucesivamente hasta llegar a d_n igual a 365 que corresponde al 31 de Diciembre. De esta manera, es posible obtener los valores de la distancia entre el Sol y la Tierra para cada día del año en Unidades Astronómicas [AU], tal como se representa en la figura 15 donde la variación anual de la distancia del Sol a la Tierra fue obtenida a través de las ecuaciones desarrolladas por Spencer (Ec. 8 y Ec. 9).

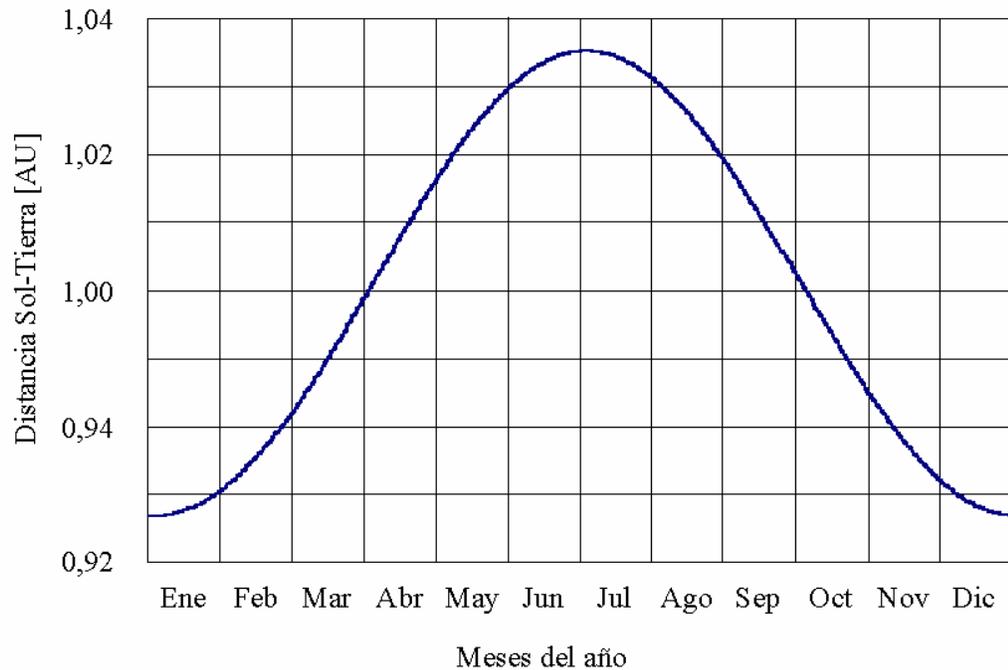


Figura 15: Curva de variación de la distancia entre el Sol y la Tierra a lo largo del año. (Fuente: Iqbal, 1983).

Sin embargo, esta no es la única fórmula que existe para estimar la distancia del Sol a la Tierra, la elección entre una fórmula y otra depende de las necesidades para las cuales se requieren obtener los valores de distancia, un ejemplo lo representa la siguiente ecuación (Ec. 11).

$$E_o = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d_n}{365}\right) \quad \text{Ec. 11}$$

Al igual que en la ecuación anterior (Ec. 10), en este caso d_n representa el día juliano del año, es decir, se trata de una ordenación ordinaria de los días del año asignando como d_n igual a 1 al 1° de Enero, d_n igual a 32 al 1° de Febrero, y así sucesivamente hasta llegar a d_n igual a 365 que corresponde al 31 de Diciembre. Esta ecuación (Ec. 11) fue desarrollada por Duffie y Beckman para determinar la distancia entre el Sol y la Tierra, la cual es utilizada en la mayoría de las aplicaciones de ingeniería y tecnología (Cañada y Salvador, 1997).

Declinación solar

El movimiento de rotación que produce el día y la noche lo realiza la Tierra sobre si misma alrededor de un eje conocido como eje polar, el cual está inclinado aproximadamente $23,5^\circ$ con respecto a la normal al plano eclíptico. A lo largo del año el ángulo entre el eje polar y la normal al plano eclíptico permanece sin variación, lo mismo es válido para el ángulo entre el plano ecuatorial terrestre y el plano eclíptico. Sin embargo, el ángulo que existe entre el plano ecuatorial terrestre y la línea que une los centros del Sol y la Tierra cambia cada día, en realidad, cada instante. Este ángulo que se representa a través de la letra δ es denominado declinación solar y se debe a la inclinación que presenta el eje en torno al cual gira la Tierra (Iqbal, 1983).

El valor de esta variable es alrededor de cero los días 21 de Marzo y 21 de Septiembre, durante los respectivos equinoccios lo que literalmente se conoce como días y noches iguales. En cambio, la declinación solar tiene un valor de aproximadamente $+ 23^\circ 27'$ el 21 de Junio, y alrededor de $- 23^\circ 27'$ el 21 de Diciembre, durante los respectivos solsticios, tal como se observa en la figura 16 (Sarmiento, 1995).

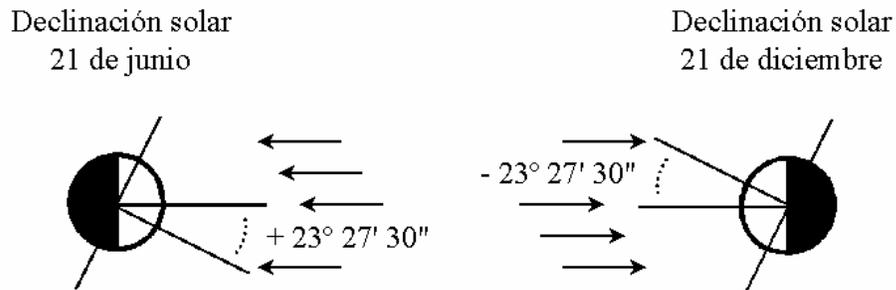


Figura 16: Declinación solar durante los respectivos solsticios de invierno y verano. (Fuente: Sarmiento, 1995).

Para un observador en cualquier punto de la Tierra, el significado de la declinación solar se puede describir mediante el trazado de la esfera celeste. En este caso, la trayectoria que realiza el Sol a través de la Esfera Celeste describe una órbita, la cual reproduce la variación de la declinación solar a lo largo del año. La intersección del plano ecuatorial terrestre con el plano descrito por el movimiento aparente del Sol forman un ángulo de aproximadamente $23^{\circ} 27'$. En cualquier instante, la posición del Sol relativa al plano del ecuador celeste describe el ángulo de declinación solar (Cañada y Salvador, 1997).

En 24 horas, el cambio máximo en la declinación solar, que ocurre durante los equinoccios, es de menos de $0,5^{\circ}$. No obstante, por lo general para su cálculo esta variable es considerada constante por 24 horas. A raíz de esto, un gran número de autores ha desarrollado expresiones mediante las cuales es posible obtener valores aproximados de declinación solar con variados grados de precisión. Spencer (1971, citado por Iqbal, 1983) presentó la siguiente expresión (Ec. 12) para la declinación solar medida en grados.

$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cdot \cos \Gamma + 0,070257 \cdot \sen \Gamma - 0,006758 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000907 \cdot \sen 2\Gamma - 0,002697 \cdot \cos 3\Gamma + 0,00148 \cdot \sen 3\Gamma) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad \text{Ec. 12}$$

Esta ecuación estima la declinación solar con un error máximo de 0,0006 radianes, lo que equivale a 0,05 grados. Mientras que si se omite el término que se ubica dentro del segundo

paréntesis de la fórmula, esta ecuación estima la declinación solar con un error máximo de 0,0035 radianes, lo que equivale a 0,2 grados. A través de la utilización de esta fórmula (Ec. 12) es posible obtener los valores de la declinación solar para cada día del año en grados, tal como se representa en la figura 16.

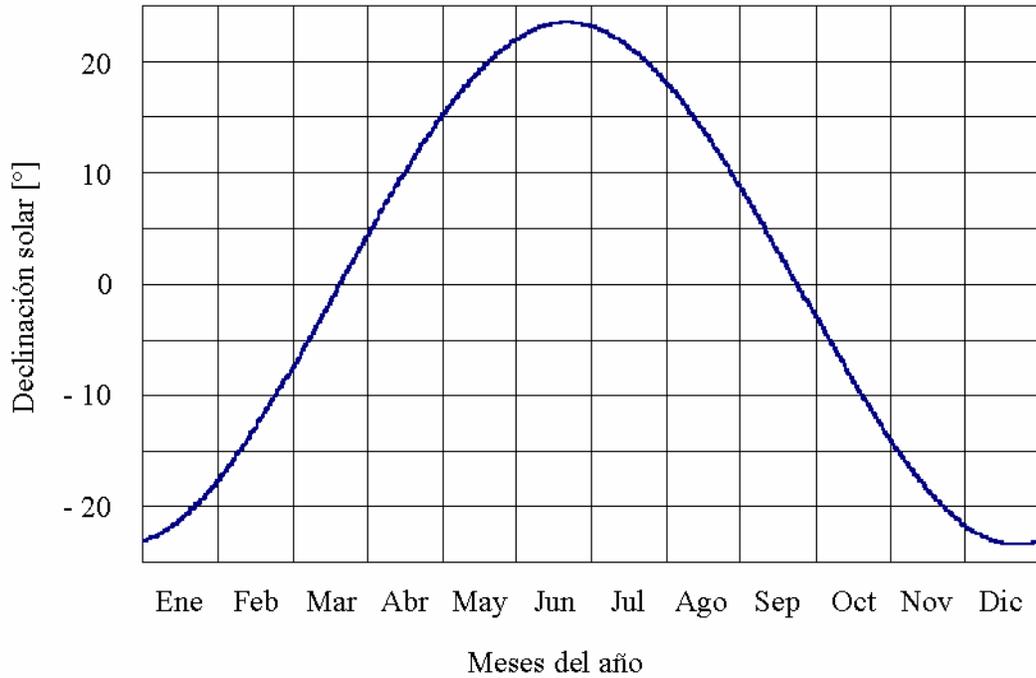


Figura 16: Curva de variación de la declinación solar a lo largo del año. (Fuente: Sarmiento, 1995).

Sin embargo, esta no es la única fórmula que existe para estimar la declinación solar, la elección entre una fórmula y otra depende de las necesidades para las cuales se requieren obtener los valores de declinación solar. Las siguientes ecuaciones (Ec. 13 y Ec. 14) corresponden a dos fórmulas que son consideradas mucho más simples y, por lo tanto, utilizadas con mayor frecuencia para obtener la declinación solar en grados (Sarmiento, 1995).

$$\delta = \text{sen}^{-1} \left[0,4 \cdot \text{sen} \left(\frac{360 \cdot (d_n - 82)}{365} \right) \right] \quad \text{Ec. 13}$$

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (d_n + 284) \right] \quad \text{Ec. 14}$$

En este caso, en ambas ecuaciones la variable d_n representa el día juliano del año, es decir, se trata de una ordenación ordinaria de los días del año asignando como d_n igual a 1 al 1° de Enero, d_n igual a 32 al 1° de Febrero, y así sucesivamente hasta llegar a d_n igual a 365 que corresponde al 31 de Diciembre. Según la información citada por Iqbal (1983), la primera ecuación (Ec. 13) fue desarrollada por Perrin de Brichambaut, en cambio, la segunda ecuación (Ec. 14) fue generada por Cooper. A través de ambas ecuaciones es posible obtener valores realmente correctos de la declinación solar en grados, sin embargo, para mayores precisiones es preferible utilizar la ecuación presentada por Spencer (Ec. 12).

Factor topográfico de la superficie terrestre

La medida y la representación de las características del relieve de una extensión limitada de terreno, con todos los detalles posibles sobre el papel de la manera más exacta posible, ha merecido atención desde hace más de cien años. A través de la caracterización de las formas de la superficie terrestre es posible reconocer la acción que ejerce la topografía sobre los diversos sistemas naturales que existen en la superficie terrestre, desde los procesos biológicos y físicos que se desarrollan en ellos hasta sus variadas condiciones climáticas, pues de ella depende en gran medida las posibilidades y facilidades que una región ofrezca al hombre para una apropiada ocupación humana.

Particularmente, la topografía tiene una notable influencia sobre numerosas variables que intervienen en la dinámica de los ecosistemas. La variedad de altitudes, pendientes y orientaciones crea fuertes contrastes locales que afectan directa e indirectamente a procesos biológicos y físicos. El clima a escala local, los procesos geomorfológicos y edafológicos, el movimiento y la acción del agua y, consecuentemente, los numerosos procesos biológicos condicionados por ellos se encuentran estrechamente asociados a la forma y altitud de la superficie del terreno en los que se desarrollan (Romero, 1985).

Esta dependencia ha sido reconocida desde hace mucho tiempo atrás por las ciencias que se ocupan del estudio de los procesos que ocurren en los diversos ecosistemas. De modo que, no sólo la geomorfología utiliza la topografía para explicar su objetivo principal basado en la descripción de las formas del terreno y los procesos responsables de los mismos, sino la edafología, la climatología, la botánica, la zoología y la ecología han recurrido comúnmente a considerar la altitud, la pendiente del terreno y/o la orientación de las laderas como variables claras para el entendimiento de muchas interrogantes (Felicísimo, 1994).

Desde un punto de vista más particular, la topografía es el principal factor local que limita la energía solar incidente sobre la superficie terrestre. Si bien, la radiación solar constituye la única entrada significativa de energía en los sistemas físicos y biológicos a escala local, como tal, condiciona una buena parte de los factores climatológicos (la temperatura y la evapotranspiración) ejerciendo una fuerte influencia en la dinámica de los ecosistemas naturales y en los cultivos, desde la producción y crecimiento hasta la distribución espacial.

En este sentido, la existencia de zonas de sombra es una variable de gran interés, especialmente en regiones montañosas, donde el relieve puede ser el factor determinante más importante para determinar la intensidad de radiación solar. El hecho que un lugar particular este en sombra puede deberse a dos circunstancias denominadas ocultamiento y autoocultamiento del terreno. El ocultamiento se produce cuando la topografía del relieve circundante interrumpe la línea visual desde el Sol hasta la superficie terrestre. Mientras que, el autoocultamiento ocurre cuando el vector normal a la superficie terrestre forma un ángulo superior a 90° con el vector solar (Felicísimo, 1999).

Visualización del relieve

Por mucho tiempo, los mapas topográficos han sido las herramientas más utilizadas para visualizar la topografía del terreno y valorar su influencia sobre los sistemas naturales. La interpretación y en definitiva la utilización de estos mapas es bastante ágil para la percepción visual de la superficie topográfica. No obstante, su construcción manual que se logra mediante la utilización de distintos métodos, dentro de los cuales se destacan las líneas de máxima pendiente, el

método de sombreado y las curvas de nivel, es bastante trabajosa y resulta limitada para realizar análisis cuantitativo. Con el paso del tiempo, este escenario se ha visto modificado debido al desarrollo que ha ido experimentando la tecnología, considerando que los medios informáticos han comenzado a ser utilizados masivamente como una herramienta habitual de trabajo. De esta manera, el tratamiento de la información cartográfica no ha sido una excepción a las nuevas tecnologías y a comenzado a ser realizada en forma digital a través de modelos (Felicísimo, 1994).

A partir de la década de los años 1950 se abrió la posibilidad de describir las características topográficas de la superficie terrestre en forma numérica, generando los conocidos Modelos Digitales del Terreno (MDT), también denominados Digital Terrain Model (DTM), manipulables con la ayuda de la informática, cuya principal característica es que su información o base de datos está codificada en cifras. Además, la naturaleza digital de este tipo de modelos, los hace susceptibles de tratamiento matemático, lo que permite construir modelos digitales derivados y realizar simulaciones numéricas expresadas mediante algoritmos (Felicísimo, 1999).

Los Modelos Digitales del Terreno han sido definidos de diversas formas, dependiendo de la evolución que hayan experimentado con el paso del tiempo, en las cuales es común considerar a este tipo de modelo digital como un conjunto de datos numéricos que describen la distribución espacial de una determinada característica del terreno. Sin embargo, Felicísimo (1994) propuso una definición para los Modelos Digitales del Terreno bastante completa y precisa, la cual introduce dos condiciones suplementarias.

La primera es que debe existir una estructura interna en el modelo que represente las relaciones espaciales entre los datos, de lo contrario, correspondería solo a una acumulación o a un listado de cifras. Mientras que, la segunda condición señala que la variable representada en el modelo debe ser cuantitativa y de distribución continua. En consecuencia, “un Modelo Digital del Terreno corresponde a una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua”.

En la cartografía convencional la descripción de las elevaciones a través del mapa topográfico constituye la infraestructura básica para desarrollar el resto de las características

topográficas del terreno impresas en mapas. Es así como en los Modelos Digitales del Terreno este papel lo desempeña el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), también definido como Digital Elevation Model (DEM), el cual describe la altimetría de una determinada superficie terrestre mediante un conjunto de cotas (Felicísimo, 1999).

En general, los primeros usos de los Modelos Digitales del Terreno se enfocaron en el tratamiento de problemas tecnológicos, científicos y militares, acelerando el diseño gráfico de la superficie terrestre mediante el tratamiento digital de datos adquiridos en terreno. Sin embargo, se tuvo que esperar algunos años para que surgieran programas de uso más general para el tratamiento de los Modelos Digitales del Terreno. De esta manera, se comenzó a desarrollar sistemas mucho más eficaces dentro de un contexto denominado Sistemas de Información Geográfica (SIG) mediante los cuales se facilita la incorporación de la información topográfica para el manejo de la cartografía digital en términos más generales. El desarrollo del primero de estos sistemas se remonta al año 1966, cuando fue creado el Sistema de Información Geográfica Canadiense, y fue a partir de ese año cuando diversas instituciones de varios países se enfocaron a considerar los Sistemas de Información Geográfica como una importante herramienta en lo relacionado a la gestión y análisis de información geográfica o espacial (Barredo, 1996).

En un principio, los Sistemas de Información Geográfica comenzaron traduciendo la información preexistente, reflejada en su mayor parte en forma de mapas temáticos de naturaleza intrínsecamente nominal. Sin embargo, muy pronto este enfoque se reveló insuficiente, por lo que comenzaron las adaptaciones y la introducción de nuevos conceptos, inexistentes en la cartografía convencional. Con lo que la separación entre el mapa convencional y el mapa virtual de los Sistemas de Información Geográfica se hizo mucho más marcada (Felicísimo, 1994).

A partir del año 1980 en adelante, se comenzó a generar programas, sistemas de hardware, software y procedimientos elaborados bajo el contexto de los Sistemas de Información Geográfica para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión. De modo que, en este período surgen importantes empresas dedicadas a la generación de los programas de SIG con diferentes características, tales como ESRI, Intergraph, Siemens o Erdas. Así mismo,

algunos laboratorios pertenecientes a universidades internacionales comenzaron a desarrollar sus propios programas, entre los que se destacan Odyssey del Laboratorio de Harvard, MAP de la Universidad de Yale, e IDRISI de la Universidad de Clark. Dentro de los programas más utilizados en los últimos tiempos se encuentran IDRISI y ArcView (Barredo, 1996).

En la actualidad, los Sistemas de Información Geográfica permiten una construcción de mapas topográficos automática sin excesivas dificultades, además, mediante su utilización es posible incluso el análisis simultáneo de otras variables que puedan tener una expresión cartográfica, potenciándose así enormemente los estudios cuantitativos en las diversas ciencias de la naturaleza. Según Felicísimo (1999), es posible concluir que “el manejo de los Modelos digitales del Terreno en los Sistemas de Información Geográfica abre las puertas a un conjunto de métodos de representación de la realidad y de simulación de procesos que complementan de forma importante la capacidad clásica de los Sistemas de Información Geográfica para el manejo de la información temática”.

Modelos Digitales de Elevación

Desde que fue concebida la idea de representar la altitud de la superficie del terreno a través de mapas digitales, han surgido varias definiciones de los modelos que describen este tipo de características. A menudo, se tiende a confundir el término de Modelo Digital del Terreno con el de Modelo Digital de Elevación, utilizándolos comúnmente como sinónimos. Sin embargo, el término de Modelo Digital del Terreno se utiliza como una denominación genérica, debido a que los modelos digitales se denominan de forma explícita de acuerdo con la propiedad representada. De modo que, un Modelo Digital de Elevación representa exclusivamente la característica de elevación del terreno. En este sentido, “un Modelo Digital de Elevación es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno” (Felicísimo, 1999).

Para describir de forma genérica un área determinada de la superficie terrestre con ciertas características geográficas, se utiliza por lo general una función bivariable, donde es necesario considerar la altitud del terreno en el punto de coordenadas de localización geográfica correspondiente. De modo que, la unidad básica de información en un Modelo Digital de Elevación

corresponde a un punto acotado, el cual está definido como una terna compuesta por un valor de altitud z y los valores de coordenadas x e y que suelen corresponder con las abscisas y ordenadas de un sistema de proyección cartográfica. Cuando estos datos se organizan en estructuras que representan las relaciones espaciales y topológicas, aparecen las variables descritas por este tipo de modelo (Felicísimo, 1994).

Por mucho tiempo, se ha establecido que solo una cobertura topográfica global utilizada de forma general garantizaría cierta convergencia en los métodos de trabajo con los Modelos Digitales del Terreno. En este sentido, los primeros inicios para conseguir una cobertura topográfica de gran extensión ocurrieron durante la década del año 1980 gracias a los trabajos elaborados por el U.S. Geological Survey, mediante los cuales se pudo estandarizar la información de las elevaciones para los Estados Unidos en un Modelo Digital de Elevaciones conocido como USGS-DEM.

Posteriormente se desarrollaron Modelos Digitales de Elevaciones de mejor resolución, los cuales describían las características topográficas de gran parte de la superficie de la Tierra con mayor detalle, dentro de los cuales se destacan el Terrain Base y el ETOPO5. En la actualidad, existe un nuevo Modelo Digital de Elevación conocido como GTOPO30, el cual proporciona un nuevo nivel de detalle en información topográfica global (United States Geological Survey, 2003).

En general, los Modelos Digitales del Terreno se consideran esencialmente como modelos estáticos en los cuales las variables representadas permanecen con valores inmutables, no obstante, también es posible utilizar los Modelos Digitales del Terreno para realizar procesos de simulación dinámica a través de la modelización de las variables representadas o de ciertos procesos o fenómenos que ocurren en la naturaleza real. El proceso de modelización es posible mediante el diseño y empleo de algoritmos numéricos, construyendo secuencias explícitas de operaciones que conducen a la solución de problemas concretos, generando nuevos Modelos Digitales del Terreno conocidos como modelos digitales derivados, los cuales se denominan de forma explícita de acuerdo con las propiedades representadas (Barredo, 1996).

Los modelos digitales derivados más sencillos pueden construirse exclusivamente con la información de los Modelos Digitales de Elevaciones y reflejan características morfológicas simples

tales como las pendientes o las orientaciones de la superficie terrestre. En cuyo caso se denominarían Modelos Digitales de Pendientes y Modelos Digitales de Orientaciones, respectivamente. Sin embargo, incorporando información auxiliar a los Modelos Digitales de Elevaciones es posible elaborar otros modelos más complejos utilizando conjuntamente la descripción morfológica del terreno y las simulaciones numéricas de procesos físicos. Algunos ejemplos corresponden a la predicción de zonas de saturación, la evaluación del riesgo de incendio o la elaboración de modelos de reflectancia (Felicísimo, 1999).

Todas estas variables pueden ser representadas como modelos digitales derivados con la misma resolución que el Modelo Digital de Elevación utilizado originalmente. Esta circunstancia permite el análisis de importantes descriptores topográficos junto con su representación virtualmente gráfica (Barredo, 1996).

GTOPO30

El GTOPO30 es un Modelo Digital de Elevación completado en el año 1996. Los datos seleccionados que contiene el GTOPO30 fueron desarrollados por la United State Geological Survey's EROS Data Center gracias al esfuerzo cooperativo de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), la United Nations Environment Programme/Global Resource Information Database, la United State Agency for International Development, el Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Información de México, la Geographical Survey Institute of Japan, el Manaaki Whenua Landcare Research of New Zealand, la Scientific Committee on Antarctic Research, la National Imagery and Mapping Agency (NIMA) y la ESRI's Digital Chart of the World, cada una de las cuales contribuyó con información relacionada con las elevaciones correspondiente a distintas áreas de la superficie terrestre (United States Geological Survey, 2003).

El GTOPO30 fue desarrollado para darle una utilidad a los datos geospaciales usados comúnmente como información topográfica en escalas regionales y continentales. La información contenida en el GTOPO30 cubre un área global cuya extensión latitudinal va entre los rangos 90° latitud norte hasta 90° latitud sur, y cuya extensión longitudinal va entre los rangos 180° longitud este hasta 180° longitud oeste. El espacio horizontal de la grilla corresponde a 30 arco segundos

(0,008333333°) aproximadamente 1 kilómetro, resultando en un Modelo Digital de Elevación con dimensiones de 21.600 filas y 43.200 columnas.

En consecuencia, la escala de representación del GTOPO30 es de 1 a 1.000.000 y el sistema de coordenadas horizontales está en grados decimales de latitud y longitud referente al Sistema Geodésico Mundial de 1984 (World Geodetic System of 1984, WGS84). Además, las unidades verticales representan la elevación en metros de la superficie terrestre sobre el nivel medio del mar, donde el rango de los valores de elevación del GTOPO30 va desde -407 hasta 8.752 metros. En este Modelo Digital de Elevación las áreas oceánicas han sido enmascaradas como datos “sin información” y se les ha asignado un valor de -9.999 . Sin embargo, las pequeñas islas ubicadas en los océanos cuyas dimensiones son menores de aproximadamente un kilómetro cuadrado no son representadas en el GTOPO30 debido a la naturaleza estructural de este Modelo Digital de Elevación.

En la actualidad el GTOPO30 proporciona un nuevo nivel de detalle en información topográfica global. Previamente el mejor Modelo Digital de Elevación global disponible era el ETOPO5 con un espacio horizontal de la grilla de 5 arco minutos, lo que equivale a aproximadamente 10 kilómetros. Para facilitar la distribución electrónica, el GTOPO30 ha sido dividido en 33 pequeñas piezas. El área desde 60° latitud sur hasta 90° latitud norte y desde 180° longitud oeste hasta 180° longitud este es cubierta por 27 de estas piezas, cubriendo cada pieza 50° de latitud y 40° de longitud (United States Geological Survey, 2003).

La Antártica, que va desde 90° latitud sur hasta 60° latitud sur y desde 180° longitud oeste hasta 180° longitud este, es cubierta por 6 piezas, cada una de las cuales cubre 30° de latitud y 60° de longitud. Los nombres de las piezas se refieren a la longitud y latitud de la esquina superior izquierda (noreste) de la pieza. Por ejemplo, las coordenadas de la esquina superior izquierda de la pieza E020N40 son 20° longitud este y 40° latitud norte. Hay una pieza adicional que cubre toda la Antártica con información en una proyección estereográfica polar. El cuadro 3 entrega un resumen ordenado de los nombres, extensión latitudinal y longitudinal, junto con las elevaciones estadísticas para cada pieza.

Cuadro 3: Resumen de la información contenida en cada una de las piezas que conforman el Modelo Digital de Elevación GTOPO30.

Pieza	Latitud		Longitud		Elevación	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
W180N90	40	90	-180	-140	1	6.098
W140N90	40	90	-140	-100	1	4.635
W100N90	40	90	-100	-60	1	2.416
W060N90	40	90	-60	-20	1	3.940
W020N90	40	90	-20	20	-30	4.536
E020N90	40	90	20	60	-137	5.483
E060N90	40	90	60	100	-152	7.169
E100N90	40	90	100	140	1	3.877
E140N90	40	90	140	180	1	4.588
W180N40	-10	40	-180	-140	1	4.148
W140N40	-10	40	-140	-100	-79	4.328
W100N40	-10	40	-100	-60	1	6.710
W060N40	-10	40	-60	-20	1	2.843
W020N40	-10	40	-20	20	-103	4.059
E020N40	-10	40	20	60	-407	5.825
E060N40	-10	40	60	100	1	8.752
E100N40	-10	40	100	140	-40	7.213
E140N40	-10	40	140	180	1	4.628
W180S10	-60	-10	-180	-140	1	2.732
W140S10	-60	-10	-140	-100	1	910
W100S10	-60	-10	-100	-60	1	6.795
W060S10	-60	-10	-60	-20	1	2.863
W020S10	-60	-10	-20	20	1	2.590
E020S10	-60	-10	20	60	1	3.484
E060S10	-60	-10	60	100	1	2.687
E100S10	-60	-10	100	140	1	1.499
E140S10	-60	-10	140	180	1	3.405
W180S60	-90	-60	-180	-120	1	4.009
W120S60	-90	-60	-120	-60	1	4.743
W060S60	-90	-60	-60	0	1	2.916
W000S60	-90	-60	0	60	1	3.839
E060S60	-90	-60	60	120	1	4.039
E120S60	-90	-60	120	180	1	4.363
ANTARCPS	-90	-60	-180	180	1	4.748

(Fuente: United States Geological Survey, 2003).

Las 27 piezas que individualmente cubren 50° de latitud y 40° de longitud, tienen cada una 6.000 filas y 4.800 columnas. Las 6 piezas de la Antártica que cubren individualmente 30° de latitud y 60° de longitud, tienen cada una 3.600 filas y 7.200 columnas. La pieza denominada W100S10 que se observa en la figura 17, representa las elevaciones correspondientes a todo el territorio de Chile, junto a los países que lo limitan.

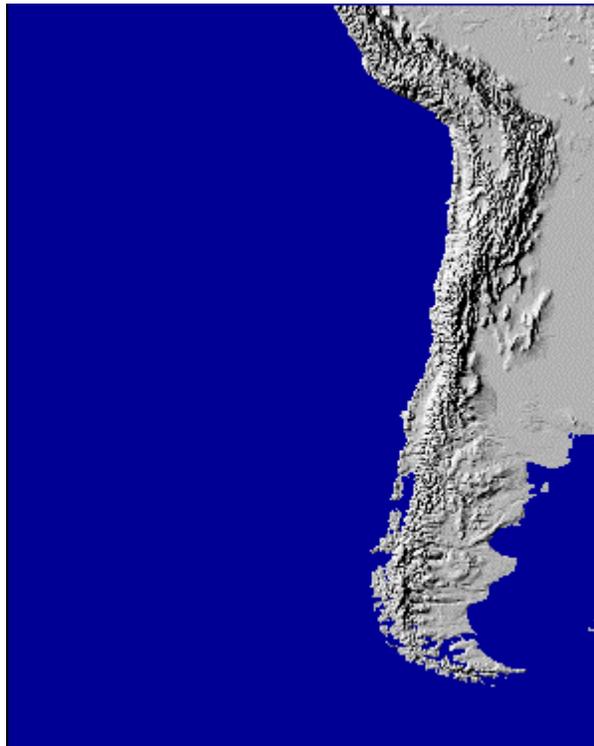


Figura 17: Imagen que representa al Modelo Digital de Elevación correspondiente al territorio chileno continental del GTOPO30. (Fuente: United States Geological Survey, 2003).

Relación trigonométrica entre el Sol y la Tierra

Si bien, la intensidad y disponibilidad de radiación solar que llega a la superficie de la Tierra depende principalmente del factor astronómico entre el Sol y la Tierra y del factor topográfico de la superficie terrestre, matemáticamente se han ido desarrollado ciertas relaciones físicas entre estos dos factores considerando una serie de términos que se establecen a partir de la

utilización de la esfera celeste. A partir de este sistema de coordenadas astronómico es posible definir la posición del Sol en el cielo con respecto a las coordenadas de una superficie cualquiera en la Tierra, ya sea horizontal o inclinada (Cañada y Salvador, 1997).

Con este plano de referencia se puede establecer que en cualquier momento dado un observador ubicado sobre una superficie terrestre horizontal tiene una posición correspondiente con la esfera celeste, tal como se indica en la figura 18, la cual es denominada la línea zenit (cenit) del observador. Este término corresponde al punto de intersección de la esfera celeste con una normal a la superficie terrestre en la posición del observador. El punto direccionalmente opuesto al zenit es denominado nadir, este término es de origen árabe e indica el punto de la bóveda celeste a las antípodas del observador.

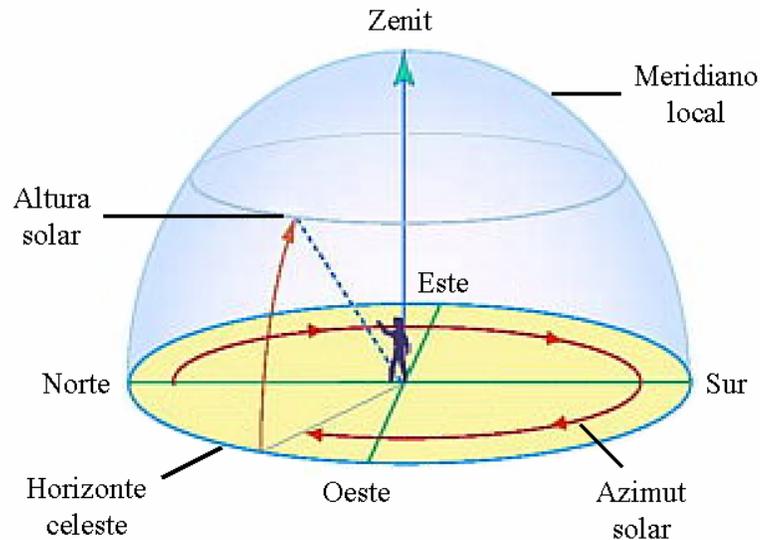


Figura 18: Principales parámetros que definen la posición del Sol en la esfera celeste. (Fuente: Astromía, 2003).

Considerando este sistema de referencia, a continuación se explican los parámetros más importantes que definen la posición del Sol en el cielo con respecto a un observador ubicado sobre la superficie de la Tierra (Sarmiento, 1995).

- Ángulo zenit (θ_z) también denominado la distancia del zenit, corresponde al ángulo que se forma entre la línea zenit del observador y la línea que une al observador con el Sol. Este es un ángulo entre 0° y 90° .
- Altitud solar (α) también denominada la elevación solar o la altura solar, corresponde a la altura angular del Sol sobre el horizonte celeste del observador. Este es un ángulo entre 0° y 90° . La altitud solar es el complemento del ángulo zenit, es decir, la suma de ambos corresponde a 90° .
- Azimut (acimut) solar (ψ) también denominado ángulo azimutal del Sol, corresponde a la desviación angular de la proyección del rayo solar en el plano horizontal con respecto al meridiano local. Este ángulo se mide positivo hacia el oeste, negativo hacia el este, hacia el norte es 0° y hacia el sur es 180° , de esta manera, el azimut solar varía de 0° a 180° hacia el oeste y de 0° a -180° hacia el este.
- Declinación solar (δ) corresponde a la posición angular del Sol durante el día con respecto al plano del ecuador. Este ángulo varía en un rango de $\pm 23^\circ$ entre los solsticios de verano e invierno.
- Latitud geográfica del lugar (ϕ) corresponde a la posición angular hacia el norte o el sur del ecuador. Este ángulo varía en un rango de 90° entre los polos geográficos norte y sur, siendo positivo en el hemisferio norte, donde va desde los 0° a 90° , y negativo en el hemisferio sur, donde va desde los 0° hasta los -90° .
- Ángulo horario (ω) corresponde al desplazamiento angular del Sol hacia el este o el oeste del meridiano local debido al movimiento de rotación de la Tierra sobre su propio eje. Este ángulo se mide positivo hacia el oeste, negativo hacia el este, hacia el mediodía tiene un valor de 0° y hacia la medianoche tiene un valor de 180° , de esta manera, el ángulo horario cambia 15° por cada hora que pasa, siendo su valor menor a cero en la mañana y mayor a cero en la tarde.
- Pendiente de la superficie (β) corresponde al ángulo de inclinación que presenta la superficie donde se encuentra el observador con respecto a la posición horizontal.

- Ángulo de incidencia (θ) para una superficie orientada arbitrariamente corresponde al ángulo que se forma entre la normal a la superficie inclinada y la línea que une al observador con el Sol. Este es un ángulo entre 0° y 90° .
- Azimut (acimut) de la superficie (γ) también denominado ángulo azimutal de la superficie, corresponde a la desviación angular de la proyección de la normal a la superficie inclinada con respecto al meridiano local. Este ángulo se mide positivo hacia el oeste, negativo hacia el este, hacia el norte es 0° y hacia el sur es 180° , de esta manera, el azimut de la superficie varía de 0° a 180° hacia el oeste y de 0° a -180° hacia el este. En términos prácticos, este concepto corresponde a la orientación o exposición que presenta la superficie donde se encuentra el observador.

Las figuras 19 y 20 describe las distintas trayectorias del movimiento aparente del Sol con respecto a un observador ubicado sobre la superficie de la Tierra para cada uno de los hemisferios por separado y tomando como referencia la esfera celeste. El recorrido del Sol determinado por la curva roja ocurre durante el solsticio de invierno, mientras que la curva de color blanca describe el recorrido del Sol durante el solsticio de verano. Además, la trayectoria que realiza el Sol durante los equinoccios de otoño y primavera son representados por la curva de color azul.

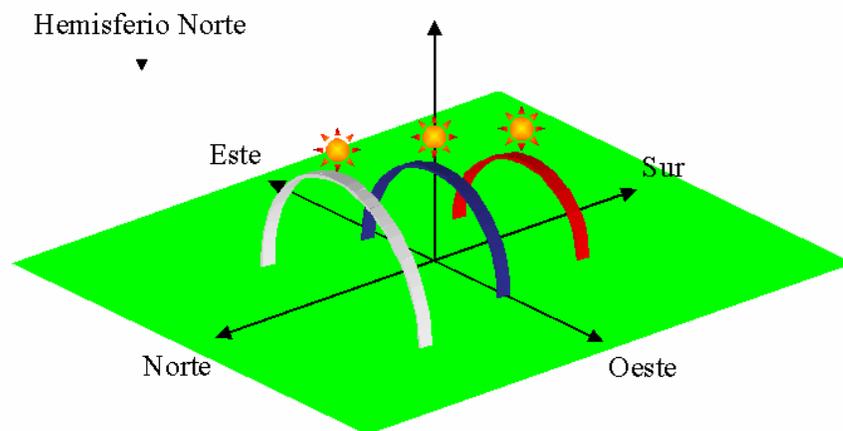


Figura 19: Recorrido del Sol para un observador ubicado en el Hemisferio Norte teniendo como referencia la esfera celeste. Los recorridos de color rojo, azul y blanco corresponden al solsticio de invierno, a los equinoccios y al solsticio de verano, respectivamente. (Fuente: Sarmiento, 1995).

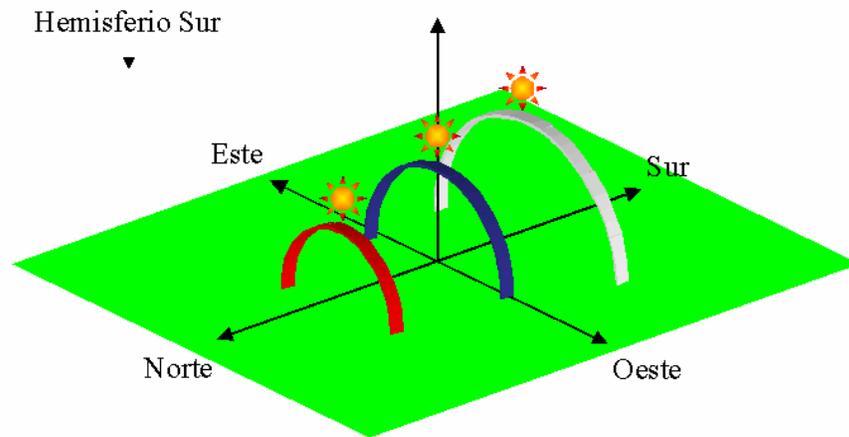


Figura 20: Recorrido del Sol para un observador ubicado en el Hemisferio Sur teniendo como referencia la esfera celeste. Los recorridos de color rojo, azul y blanco corresponden al solsticio de invierno, a los equinoccios y al solsticio de verano, respectivamente. (Fuente: Sarmiento, 1995).

De ambas figuras anteriores se puede deducir que durante el solsticio de verano el Sol se desplaza alcanzando mayor altitud al mediodía y el azimut solar recorrido es superior a 180° . En cambio, durante el solsticio de invierno el Sol alcanza la menor altitud al mediodía y el azimut solar recorrido es inferior a 180° . En tanto que, durante los equinoccios de otoño y primavera, mientras se desprece la variación de la declinación durante el día, el Sol se desplazará a través de un plano recto y el azimut solar recorrido será igual a 180° (Sarmiento, 1995).

A partir de la utilización de estos parámetros es posible establecer ciertas relaciones trigonométricas entre la posición del Sol en el cielo con respecto a una superficie horizontal o a una superficie con cierto grado de inclinación. Para el caso particular de una superficie inclinada es necesario considerar la pendiente de la superficie con respecto a la posición horizontal y la orientación de la superficie en relación al meridiano local.

No obstante, una forma apropiada de explicar lo que ocurre con los rayos solares sobre una superficies inclinada es establecer como casos independientes las relaciones trigonométricas entre la posición del Sol en el cielo con respecto a una superficies orientada arbitrariamente y a una superficie orientada hacia el ecuador tal como se explica a continuación (Iqbal, 1983).

Posición del Sol relativa a superficies horizontales

La figura 21 describe los parámetros que comúnmente se utilizan para determinar la posición aparente del Sol en el cielo con respecto a un observador ubicado en una superficie horizontal en la Tierra.

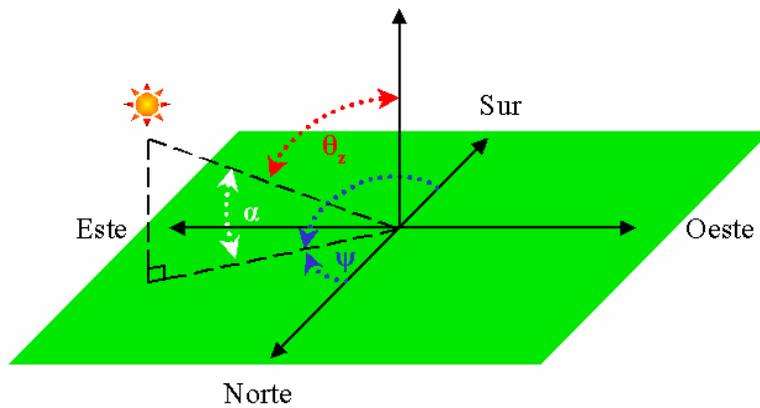


Figura 21: Esquema gráfico de la posición del Sol con respecto a una superficie horizontal, donde la flecha blanca corresponde a la altitud solar, la flecha roja representa el ángulo zenit y la flecha azul determina el azimut solar. (Fuente: Sarmiento, 1995).

En consecuencia, para una posición geográfica dada, en ausencia de la atmósfera terrestre, las relaciones trigonométricas entre el Sol y una superficie horizontal en la Tierra son las siguientes ecuaciones (Ec. 15, Ec. 16 y Ec. 17).

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega_h \quad \text{Ec. 15}$$

$$\sin \alpha = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega_h \quad \text{Ec. 16}$$

$$\cos \psi = \frac{\sin \alpha \cdot \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cdot \cos \phi} \quad \text{Ec. 17}$$

Donde θ_z es el ángulo zenit medido en grados para una superficie horizontal, δ corresponde a la declinación solar medida en grados, ϕ es la latitud geográfica del lugar medida en grados, ω_h representa al ángulo horario medido en grados para una superficie horizontal, α es la altitud solar medida en grados para una superficie horizontal y ψ corresponde al azimut solar medido en grados para una superficie horizontal. En este caso, para estimar el azimut solar a partir de la ecuación anterior es necesario considerar que el $\cos \psi$ será mayor o igual a cero si el azimut solar varía entre 0° y 90° , en cambio, el $\cos \psi$ será menor o igual a cero mientras el azimut solar varíe entre 90° y 180° , tal como se señala a continuación (Ec. 18 y Ec. 19).

$$0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ \qquad \cos \psi \geq 0 \qquad \text{Ec. 18}$$

$$90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \qquad \cos \psi \leq 0 \qquad \text{Ec. 19}$$

En algunas ocasiones se suele obtener el azimut solar a partir de la siguiente ecuación (Ec. 20).

$$\text{sen } \psi = \frac{\cos \delta \cdot \text{sen } \omega_h}{\cos \alpha} \qquad \text{Ec. 20}$$

Donde ψ es el azimut solar medido en grados para una superficie horizontal, δ representa a la declinación solar medida en grados, ω_h es el ángulo horario medido en grados para una superficie horizontal y α corresponde a la altitud solar medida en grados para una superficie horizontal. No obstante, es necesario señalar que esta ecuación entrega valores incorrectos cuando el azimut solar es mayor a 90° (Iqbal, 1983).

Recurriendo a las ecuaciones anteriores es posible definir la magnitud del desplazamiento angular diario del Sol con respecto al meridiano local para una superficie horizontal en función de la declinación solar y de la latitud geográfica del lugar considerando que tanto en el orto como en el ocaso del Sol el ángulo zenit θ_z para una superficie horizontal es igual a 90° y la altitud solar α para una superficie horizontal corresponde a 0° . En consecuencia, el ángulo horario para este tipo de

superficie definido por los puntos de salida y puesta del Sol en un día cualquiera está determinado por la siguiente ecuación (Ec. 21).

$$\omega_h = \pm \cos^{-1} \cdot (-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad \text{Ec. 21}$$

Donde ω_h es el ángulo horario medido en grados para una superficie horizontal, ϕ representa a la latitud geográfica del lugar medida en grados y δ es la declinación solar medida en grados. Es necesario señalar que la diferencia del signo representa el ángulo horario correspondiente al orto y al ocaso del Sol, donde el signo negativo corresponde a la salida del Sol por el horizonte, en cambio, el signo positivo corresponde a la puesta del Sol por el horizonte. De esta manera, el ángulo horario de cada uno de estos puntos para una superficie horizontal corresponde a las siguientes ecuaciones (Ec. 22 y Ec. 23).

$$\omega_{srh} = -\cos^{-1} \cdot (-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad \text{Ec. 22}$$

$$\omega_{ssh} = +\cos^{-1} \cdot (-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad \text{Ec. 23}$$

Donde ω_{srh} corresponde al ángulo horario de la salida del Sol medido en grados para una superficie horizontal, en cambio, ω_{ssh} es el ángulo horario de la puesta del Sol medido en grados para una superficie horizontal. En este caso, es posible observar que el ángulo horario de la salida del Sol para una superficie horizontal es igual al ángulo horario de la puesta del Sol para una superficie horizontal, excepto por la diferencia del signo (Cañada y Salvador, 1997).

Si bien, las ecuaciones anteriores son válidas exclusivamente para todas aquellas superficies que no presentan algún grado de inclinación, es decir, superficies que sean horizontales, existen algunas excepciones relacionadas con el ángulo horario para este tipo de superficies que se generan en ciertos lugares y épocas del año. Por ejemplo, en la región polar, a partir del solsticio de invierno y durante aproximadamente seis meses seguidos el Sol no llega a salir por el horizonte, sucediendo una noche continua durante medio año. Similarmente, en la región polar, a partir del solsticio de verano y durante aproximadamente seis meses seguidos el Sol no llega a ponerse en el horizonte,

sucediendo un día continuo durante medio año. En ambos casos es imposible calcular la hora de salida y puesta del Sol, debido a que ocurre lo siguiente (Ec. 24 y Ec. 25).

$$\cos \omega_{srh} < -1 \quad \text{Ec. 24}$$

$$\cos \omega_{ssh} > +1 \quad \text{Ec. 25}$$

Otra excepción relacionadas con el ángulo horario para superficies horizontales ocurre en el ecuador, lugar en donde el valor de la latitud geográfica corresponde a cero grados. Según las ecuaciones anteriores es posible estimar la magnitud del ángulo horario de la puesta del Sol y del ángulo horario de la salida del Sol, las cuales entregan un valor de 90° para cada uno de estos ángulos. En este caso, la duración del día es siempre igual a 12 horas, cuyo valor depende exclusivamente de la declinación solar del día (Iqbal, 1983).

Además, durante los respectivos equinoccios, el valor de la declinación solar para una superficie horizontal ubicada en cualquier latitud geográfica corresponde a cero grados. Nuevamente, las ecuaciones que estiman la magnitud del ángulo horario de la puesta del Sol y del ángulo horario de la salida del Sol entregan un valor de 90° para cada uno de estos ángulos. En este caso, la duración del día es siempre igual a 12 horas, cuyo valor es independiente de la latitud geográfica (Sarmiento, 1995).

Posición del Sol relativa a superficies orientadas arbitrariamente

La principal característica que presentan las superficies orientadas arbitrariamente es que la magnitud del azimut de la superficie es mayor o menor a cero, siendo por lo tanto superficies orientadas exclusivamente hacia el oeste o hacia el este, respectivamente. Para una mayor comprensión de este tipo de superficies, en la figura 22 se señalan los principales parámetros que se utilizan para determinar la posición del Sol en el cielo con respecto a un observador ubicado en una superficie orientada arbitrariamente.

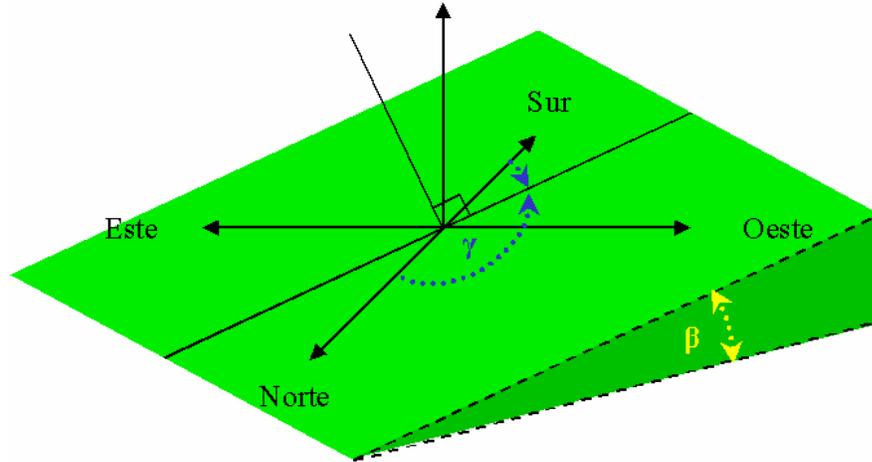


Figura 22: Esquema gráfico de la posición del Sol con respecto a una superficie orientada arbitrariamente, donde la flecha azul representa el azimut de la superficie y la flecha amarilla determina la pendiente. (Fuente: Iqbal, 1983).

En consecuencia, para una posición geográfica dada, en ausencia de la atmósfera terrestre, las relaciones trigonométricas entre el Sol y una superficie orientada en cualquier dirección arbitraria respecto al meridiano local en la Tierra son las siguientes (Ec. 26, Ec. 27 y Ec. 28).

$$\begin{aligned} \cos \theta_a &= \text{sen } \delta \cdot \text{sen } \phi \cdot \cos \beta - \text{sen } \delta \cdot \cos \phi \cdot \text{sen } \beta \cdot \cos \gamma & \text{Ec. 26} \\ &+ \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega_a \\ &+ \cos \delta \cdot \text{sen } \phi \cdot \text{sen } \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega_a \\ &+ \cos \delta \cdot \text{sen } \beta \cdot \text{sen } \gamma \cdot \text{sen } \omega_a \end{aligned}$$

$$\cos \theta_a = \cos \beta \cdot \cos \theta_z + \text{sen } \beta \cdot \text{sen } \theta_z \cdot \cos(\psi - \gamma) \quad \text{Ec. 27}$$

$$\begin{aligned} \cos \theta_a &= \text{sen } \delta \cdot (\text{sen } \phi \cdot \cos \beta - \cos \phi \cdot \text{sen } \beta \cdot \cos \gamma) & \text{Ec. 28} \\ &+ \cos \delta \cdot \cos \omega_a \cdot (\cos \phi \cdot \cos \beta + \text{sen } \phi \cdot \text{sen } \beta \cdot \cos \gamma) \\ &+ \cos \delta \cdot \text{sen } \beta \cdot \text{sen } \gamma \cdot \text{sen } \omega_a \end{aligned}$$

Donde θ_a representa al ángulo de incidencia medido en grados para una superficie orientada arbitrariamente, δ es la declinación solar medida en grados, ϕ corresponde a la latitud geográfica del

lugar medida en grados, β es la pendiente de la superficie medida en grados, γ representa al azimut de la superficie medido en grados, ω_a es el ángulo horario medido en grados para una superficie orientada arbitrariamente, θ_z corresponde al ángulo zenit medido en grados para una superficie horizontal y ψ es el azimut solar medido en grados para una superficie horizontal (Iqbal, 1983).

Del mismo modo que es esencial en ciertas aplicaciones calcular el desplazamiento angular del Sol para las diversas superficies terrestres, en ciertas ocasiones también es importante calcular para las superficies orientadas arbitrariamente el ángulo horario correspondiente a los puntos que definen la trayectoria del Sol con el horizonte. En consecuencia, a partir de la ecuación anterior es posible definir el valor de este ángulo en función de la declinación solar, la latitud geográfica del lugar, la pendiente de la superficie y el azimut de la superficie, considerando que tanto en el orto como en el ocaso del Sol el ángulo de incidencia para una superficie orientada arbitrariamente corresponde a 90° .

A través de una secuencia de operaciones matemáticas señalada por Iqbal (1983) es posible determinar el ángulo horario de la salida y la puesta del Sol para una superficie orientada arbitrariamente en un día cualquiera, lo cual se resume mediante la siguiente ecuación (Ec. 29).

$$\omega_a = \pm \cos^{-1} \cdot \left(\frac{-x \cdot y \pm \sqrt{1 - y^2 + x^2}}{1 + x^2} \right) \quad \text{Ec. 29}$$

En este caso, las variables x e y están representadas por las siguientes expresiones matemáticas (Ec. 30 y Ec. 31).

$$x = \frac{\cos \phi}{\sin \gamma \cdot \tan \beta} + \frac{\sin \phi}{\tan \gamma} \quad \text{Ec. 30}$$

$$y = \tan \delta \cdot \left(\frac{\sin \phi}{\tan \beta \cdot \sin \gamma} - \frac{\cos \phi}{\tan \gamma} \right) \quad \text{Ec. 31}$$

Donde ω_a es el ángulo horario medido en grados para una superficie orientada arbitrariamente, ϕ representa la latitud geográfica del lugar medida en grados, γ es el azimut de la superficie medido en grados, β corresponde la pendiente de la superficie medida en grados y δ es la declinación solar medida en grados. La diferencia del signo que se encuentra al principio de esta ecuación representa el ángulo horario correspondiente a cada uno de los dos puntos que definen la trayectoria aparente del Sol con el horizonte, perteneciendo el signo negativo a la salida del Sol por el horizonte y el signo positivo a la puesta del Sol por el horizonte. En consecuencia, el ángulo horario de cada uno de estos puntos para una superficie orientada arbitrariamente corresponde a las siguientes ecuaciones (Ec. 32 y Ec. 33).

$$\omega_{sra} = -\cos^{-1} \cdot \left(\frac{-x \cdot y \pm \sqrt{1 - y^2 + x^2}}{1 + x^2} \right) \quad \text{Ec. 32}$$

$$\omega_{ssa} = +\cos^{-1} \cdot \left(\frac{-x \cdot y \pm \sqrt{1 - y^2 + x^2}}{1 + x^2} \right) \quad \text{Ec. 33}$$

Donde ω_{sra} representa al ángulo horario de la salida del Sol medido en grados para una superficie orientada arbitrariamente, en cambio, ω_{ssa} es el ángulo horario de la puesta del Sol medido en grados para una superficie orientada arbitrariamente.

En el caso particular de aquellas superficies con algún grado de inclinación como lo son las superficies orientadas arbitrariamente, las magnitudes del ángulo horario para la salida y la puesta del Sol no son idénticas, además, el ángulo horario de la salida o la puesta del Sol para una superficie inclinada nunca puede ser mayor que el ángulo horario correspondiente para una superficie horizontal (Cañada y Salvador, 1997).

Sin embargo, matemáticamente las ecuaciones anteriores entregan valores del ángulo horario de la salida del Sol para una superficie orientada arbitrariamente mayores que del ángulo horario de la salida del Sol para una superficie horizontal, y valores del ángulo horario de la puesta del Sol para una superficie orientada arbitrariamente mayores que del ángulo horario de la puesta

del Sol para una superficie horizontal. En el caso particular de las superficies orientadas arbitrariamente, por lo general, cada uno de estos ángulos se evalúa separadamente para superficies orientadas hacia el este y para aquellas superficies orientadas hacia el oeste (Iqbal, 1983).

En consecuencia, los respectivos ángulos horarios para superficies orientadas hacia el este, es decir, cuando el azimut de la superficie es mayor a cero, pueden ser expresados a través de las siguientes ecuaciones (Ec. 34 y Ec. 35).

$$\omega_{sra} = -\min \left[\omega_{srh}, \cos^{-1} \cdot \left(\frac{-x \cdot y - \sqrt{1 - y^2 + x^2}}{1 + x^2} \right) \right] \quad \text{Ec. 34}$$

$$\omega_{ssa} = +\min \left[\omega_{ssh}, \cos^{-1} \cdot \left(\frac{-x \cdot y + \sqrt{1 - y^2 + x^2}}{1 + x^2} \right) \right] \quad \text{Ec. 35}$$

En cambio, los respectivos ángulos horarios para superficies orientadas hacia el oeste, es decir, cuando el azimut de la superficie es menor a cero, se pueden expresar mediante las siguientes ecuaciones (Ec. 36 y Ec. 37).

$$\omega_{sra} = -\min \left[\omega_{srh}, \cos^{-1} \cdot \left(\frac{-x \cdot y + \sqrt{1 - y^2 + x^2}}{1 + x^2} \right) \right] \quad \text{Ec. 36}$$

$$\omega_{ssa} = +\min \left[\omega_{ssh}, \cos^{-1} \cdot \left(\frac{-x \cdot y - \sqrt{1 - y^2 + x^2}}{1 + x^2} \right) \right] \quad \text{Ec. 37}$$

Donde ω_{sra} corresponde al ángulo horario de la salida del Sol medido en grados para una superficie orientada arbitrariamente, ω_{srh} es el ángulo horario de la salida del Sol medido en grados para una superficie horizontal, ω_{ssa} representa al ángulo horario de la puesta del Sol medido en grados para una superficie orientada arbitrariamente, ω_{ssh} es el ángulo horario de la puesta del Sol

medido en grados para una superficie horizontal y el término min corresponde al valor más pequeño entre el ángulo horario de la salida o la puesta del Sol para una superficie horizontal y el ángulo horario correspondiente para una superficie orientada arbitrariamente. De esta manera, para determinar la magnitud del ángulo horario para una superficie orientada hacia el este o hacia el oeste es necesario evaluar este ángulo para una superficie horizontal y para una superficie orientada arbitrariamente, para luego escoger el valor más pequeño entre ambas magnitudes (Iqbal, 1983).

Posición del Sol relativa a superficies orientadas hacia el ecuador

Todas aquellas superficies que presentan un azimut de la superficie igual a cero son catalogadas como superficies orientadas hacia el Ecuador. Recurriendo a la ecuación que calcula el ángulo de incidencia para una superficie orientada arbitrariamente, es posible definir el ángulo de incidencia para una superficie orientada hacia el ecuador, considerando que en este último tipo de superficies el azimut de la superficie es igual a cero. En consecuencia, para una posición geográfica dada, en ausencia de la atmósfera terrestre, las relaciones trigonométricas entre el Sol y una superficie alineada con el meridiano local en la Tierra son las siguientes (Ec. 38 y Ec. 39).

$$\begin{aligned} \cos \theta_e &= \text{sen } \delta \cdot \text{sen } \phi \cdot \cos \beta - \text{sen } \delta \cdot \cos \phi \cdot \text{sen } \beta && \text{Ec. 38} \\ &+ \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega_e \\ &+ \cos \delta \cdot \text{sen } \phi \cdot \text{sen } \beta \cdot \cos \omega_e \end{aligned}$$

$$\cos \theta_e = \text{sen } \delta \cdot \text{sen}(\phi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\phi - \beta) \cdot \cos \omega_e \quad \text{Ec. 39}$$

Donde θ_e es el ángulo de incidencia medido en grados para una superficie orientada hacia el ecuador, δ representa a la declinación solar medida en grados, ϕ es la latitud geográfica medida en grados, β corresponde a la pendiente de la superficie medida en grados y ω_e es el ángulo horario para una superficie orientada hacia el ecuador (Iqbal, 1983).

Al igual que para las superficies horizontales y las superficies orientadas arbitrariamente, en el caso particular de las superficies orientadas hacia el ecuador también es posible calcular el ángulo

horario de la salida y la puesta del Sol, considerando que en una superficie de estas características el orto y el ocaso del Sol ocurren cuando el ángulo de incidencia es igual a 90° . Mediante la ecuación anterior es posible definir el valor del ángulo horario para una superficie orientada hacia el ecuador en función de la declinación solar, la latitud geográfica del lugar y la pendiente de la superficie con respecto a los puntos que definen la trayectoria del Sol con el horizonte en un día cualquiera. De esta manera resultaría la siguiente ecuación (Ec. 40).

$$\omega_e = \pm \cos^{-1} \cdot [-\tan\delta \cdot \tan(\phi - \beta)] \quad \text{Ec. 40}$$

Donde ω_e corresponde al ángulo horario medido en grados para una superficie orientada hacia el ecuador, δ es la declinación solar medida en grados, ϕ representa la latitud geográfica del lugar medida en grados y β es la pendiente de la superficie medida en grados. No obstante, es necesario señalar que la diferencia del signo representa al ángulo horario para una superficie orientada hacia el ecuador correspondiente a la aparición y desaparición aparente del Sol por el horizonte, siendo el signo negativo relacionado con el orto del Sol y el signo positivo con el ocaso del Sol. En consecuencia, el ángulo horario de la salida y puesta del Sol para una superficie inclinada hacia el ecuador correspondería a las siguientes ecuaciones (Ec. 41 y Ec. 42).

$$\omega_{sre} = -\cos^{-1} \cdot [-\tan\delta \cdot \tan(\phi - \beta)] \quad \text{Ec. 41}$$

$$\omega_{sse} = +\cos^{-1} \cdot [-\tan\delta \cdot \tan(\phi - \beta)] \quad \text{Ec. 42}$$

Donde ω_{sre} corresponde al ángulo horario de la salida del Sol medido en grados para una superficie orientada hacia el ecuador, en cambio, ω_{sse} es el ángulo horario de la puesta del Sol medido en grados para una superficie orientada hacia el ecuador. Como es posible observar, en este caso al igual que en las superficies horizontales, la magnitud del ángulo horario de la salida del Sol es igual a la magnitud del ángulo horario de la puesta del Sol, excepto por la diferencia del signo.

Sin embargo, la utilización de las ecuaciones relacionadas con el ángulo horario durante el orto y el ocaso del Sol presenta algunas excepciones relacionadas con ciertos lugares y épocas del

año. Por ejemplo, durante los respectivos equinoccios el valor de la declinación solar para una superficie orientada hacia el ecuador en cualquier latitud geográfica corresponde a cero grados. Según las ecuaciones anteriores es posible estimar la magnitud del ángulo horario de la salida del Sol y del ángulo horario de la puesta del Sol, las cuales entregan un valor de 90° para cada uno de estos ángulos. En este caso, las magnitudes correspondientes a cada uno de los ángulos es independiente de la latitud geográfica del lugar y de la pendiente de la superficie (Cañada y Salvador, 1997).

Otra excepción ocurre durante los respectivos solsticios, en el solsticio de verano la declinación solar presenta un valor mayor a cero grados y en el solsticio de invierno el valor de la declinación solar es menor a cero grados. En cada una de estas fechas es posible evaluar matemáticamente a partir de las ecuaciones anteriores el desplazamiento angular del Sol con respecto al meridiano local. A partir de esta estimación se deduce que, en el primer caso el ángulo horario de la salida del Sol para una superficie orientada hacia el ecuador es menor que el ángulo horario correspondiente para una superficie horizontal, en cambio, en el segundo caso el ángulo horario de la salida del Sol para una superficie orientada hacia el ecuador es mayor que el ángulo horario correspondiente para una superficie horizontal (Iqbal, 1983).

Sin embargo, en el caso particular de las superficies con algún grado de inclinación como es el caso de las superficies orientadas hacia el ecuador, el ángulo horario de la salida o la puesta del Sol para una superficie inclinada nunca puede ser mayor que el ángulo horario correspondiente para una superficie horizontal. Por lo tanto, el ángulo horario de la salida y la puesta del Sol para una superficie orientada hacia el ecuador durante los respectivos solsticios se evalúa a través de las siguientes ecuaciones (Ec. 43 y Ec. 44).

$$\omega_{sre} = -\min[\cos^{-1}(-\tan\delta \cdot \tan\phi), \cos^{-1}(-\tan\delta \cdot \tan(\phi - \beta))] \quad \text{Ec. 43}$$

$$\omega_{sse} = +\min[\cos^{-1}(-\tan\delta \cdot \tan\phi), \cos^{-1}(-\tan\delta \cdot \tan(\phi - \beta))] \quad \text{Ec. 44}$$

Donde el término \min representa la magnitud más pequeña entre el ángulo horario de la salida o la puesta del Sol para una superficie horizontal y el ángulo horario correspondiente para una superficie orientada hacia el ecuador. De esta manera, para determinar la magnitud del ángulo horario para una superficie alineada con el meridiano local es necesario evaluar este ángulo para una superficie horizontal y para una superficie orientada hacia el ecuador, para luego escoger el valor más pequeño entre ambas magnitudes (Iqbal, 1983).

Factor atmosférico de la Tierra

La atmósfera terrestre es la masa de aire que rodea completamente la Tierra, donde el aire que la constituye es una mezcla de gases que se mantienen alrededor de la superficie terrestre gracias a la acción de la fuerza gravitacional y consta principalmente de nitrógeno molecular y oxígeno molecular. Al igual que todos los cuerpos, el aire presente en la atmósfera también tiene su propio peso, el cual debe ser soportado por los habitantes de la Tierra. La fuerza ejercida por el peso de la atmósfera es lo que se denomina presión atmosférica y es directamente proporcional al espesor de la atmósfera terrestre.

La presión atmosférica al nivel del mar equivale a unos 1.033 gramos por centímetro cuadrado, pero va disminuyendo según aumenta la altitud. Así, cuando un observador en la Tierra asciende por la montaña, el espesor de la atmósfera sobre el observador disminuye y, por lo tanto, la presión atmosférica también disminuye. Es imposible señalar exactamente el espesor de la atmósfera debido a que no posee una superficie superior que la limite. Teóricamente, la atmósfera puede tener hasta 32.000 kilómetros de espesor, porque la gravedad terrestre tiene fuerza suficiente para retener el aire hasta esa distancia.

Cabe señalar que la atmósfera se va haciendo menos densa según aumenta la altura sobre el nivel del mar, hasta que se confunde con el vacío del espacio interplanetario hasta ser imperceptible. Por otro lado, los gases que componen la atmósfera terrestre se ubican a distintos niveles sobre el nivel del mar, encontrándose en las partes más bajas de la atmósfera los gases de mayor peso atómico, mientras que en las partes más altas se encuentran los gases de menor peso atómico.

Además, debido a la compresibilidad de la atmósfera, la mitad de todos los gases que componen la atmósfera terrestre se encuentran debajo de los 5.500 metros de altura aproximadamente, mientras que las tres cuartas partes restantes se ubican desde los 5.500 hasta los 11.000 metros de altura aproximadamente.

Efectos de la atmósfera sobre la Tierra

Es necesario mencionar que la atmósfera terrestre nunca está en calma, sino que sus componentes se mantienen en constante movimiento debido a la tendencia de la atmósfera de distribuir de igual manera el calor que recibe desigualmente. Este movimiento atmosférico posee una gran importancia geográfica pues contribuye a distribuir la temperatura y la humedad hacia todos los lugares de la Tierra. Con respecto a la distribución de las temperaturas, se transporta parte del calor de las regiones cálidas hacia las regiones frías, y parte del frío de las regiones frías hacia las regiones cálidas. Igualmente, los movimientos atmosféricos participan en la distribución de la humedad, pues cuando la atmósfera pasa sobre los mares cálidos recoge humedad, la cual pierde al pasar sobre la tierra.

Los constantes cambios de temperatura y humedad que se generan por los movimientos de la atmósfera influyen sobre la presión atmosférica, variando su valor de un lugar a otro de la superficie terrestre e incluso a distintas horas en un mismo lugar. Cuando aumenta la temperatura, el aire se calienta y se eleva, con lo que disminuye la presión atmosférica. También el aire húmedo (aire cargado de vapor de agua) produce una disminución en la presión atmosférica, pues un volumen de vapor de agua pesa menos que un volumen equivalente de aire seco.

De esta manera es posible distinguir áreas de baja presión, donde la presión atmosférica es menor a la presión atmosférica al nivel del mar, y áreas de alta presión, donde la presión atmosférica es mayor a la presión atmosférica al nivel del mar. Las áreas de baja presión denominadas comúnmente ciclones representan áreas de tiempo inestable, mientras que, las áreas de alta presión también denominadas anticiclones representan áreas de buen tiempo (Romero, 1985).

Una de las principales funciones de la atmósfera terrestre es intersectar el espectro de radiación electromagnética emitida por el Sol, antes de llegar a la superficie de la Tierra. En este sentido, 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.

Es así como, parte de la radiación que atraviesa la atmósfera se transforma en radiación difusa debido al fenómeno de dispersión molecular, el cual se debe a la presencia en la atmósfera de las partículas de polvo, el vapor de agua y las moléculas que componen el aire. Otra parte de la radiación solar es absorbida en la atmósfera, proceso que se debe predominantemente al ozono, al vapor de agua y al dióxido de carbono (Liou, 1980).

Los rayos gamma con una elevada energía junto con los rayos X impactan en los átomos que componen la atmósfera terrestre y pierden energía en una capa atmosférica a unos 80 kilómetros de la superficie. A 50 kilómetros de altura, la luz ultravioleta de longitud de onda corta, peligrosa para los seres humanos, entra en colisión con las moléculas de ozono. Las nubes, el polvo y los contaminantes del aire absorben y esparcen parte de la luz restante, coloreando el cielo de azul. Sólo llega a la superficie terrestre la luz del espectro visible, junto con algunos rayos infrarrojos y algunas ondas de radio, además de una pequeña parte de rayos ultravioleta de longitud de onda más larga. De esta manera, la capa exterior más delgada de la atmósfera terrestre percibe toda la gama de longitudes de onda del espectro electromagnético solar, sin embargo, a medida que se desciende hacia la superficie terrestre la gama de longitudes de onda que atraviesa la atmósfera terrestre va disminuyendo.

Nubosidad de la atmósfera

Para determinar ciertos 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. Las nubes están constituidas principalmente por agua, sin

embargo, según la temperatura existente en el nivel atmosférico donde se encuentren, las nubes pueden estar constituidas principalmente por agua en diferentes estados físicos, ya sea por gotas minúsculas de agua, por copos de nieve o por cristales de hielo (Iqbal, 1983).

En el aire atmosférico se encuentra una cantidad variable de agua en estado gaseoso. Este vapor de agua visible e incoloro casi nunca llega a más del 4% del volumen total del aire. A pesar de que se trata de una cifra bastante baja, su influencia sobre la vida en la Tierra es bastante significativa. La presencia del vapor de agua en la atmósfera se debe al proceso de circulación del agua que ocurre en la atmósfera, cuyas principales etapas son la evaporación, la condensación y la precipitación.

Dentro de este proceso conocido como ciclo hidrológico, la etapa de condensación da lugar a la formación de nubes, sin embargo, debido a las condiciones atmosféricas que se requieren para generar este proceso, las nubes se originan exclusivamente en las áreas de baja presión, donde aumenta la temperatura y la humedad del aire. En estas áreas las corrientes elevan el aire húmedo expandiéndolo, hasta que al llegar este aire caliente a un nivel donde el descenso de la temperatura provoca la saturación, el vapor de agua en suspensión se condensa formando las nubes. Por lo tanto, el comportamiento y la distribución de los centros de alta y baja presión parece ser un buen descriptor para la nubosidad del aire. En este sentido, se han desarrollado varios estudios que permiten esbozar un esquema climático para la región central de Chile considerando el resultado de la interacción media mensual entre los distintos centros de acción meteorológicos.

Los grandes centros o masas de aire que se han detectado en la región central de Chile son: el Anticiclón del Pacífico (AP), las Bajas Polares (BP), la Depresión Continental (DC) y la Profundización de la Depresión Continental (PDC). A través de una inspección detallada de las cartas sinópticas diarias, es posible inferir que el dominio espacial de los centros mencionados anteriormente resulta ser acotado. En este sentido, el centro del Anticiclón del Pacífico se ubica entre las latitudes de Copiapó y Valparaíso, las Bajas Polares rara vez se encuentran al norte de La Serena y el centro de la Profundización de la Depresión Continental se observa normalmente entre La Serena y Los Ángeles (Parra y Morales, 1994).

La figura 24 señala dos cartas sinópticas que pueden ser consideradas como representativas de las condiciones meteorológicas predominantes en Chile, correspondientes a dos días consecutivos en Febrero del año 1979. En estas cartas sinópticas es posible observar que las curvas de isobaras forman una cuña en el continente cuya localización y presión máxima varía considerablemente de un día a otro. En la carta sinóptica correspondiente al 21 de febrero, la Depresión Continental y/o la Profundización de la Depresión Continental se encuentra al norte de la cuña, en cambio, al sur de la cuña se encuentran las Bajas Polares.

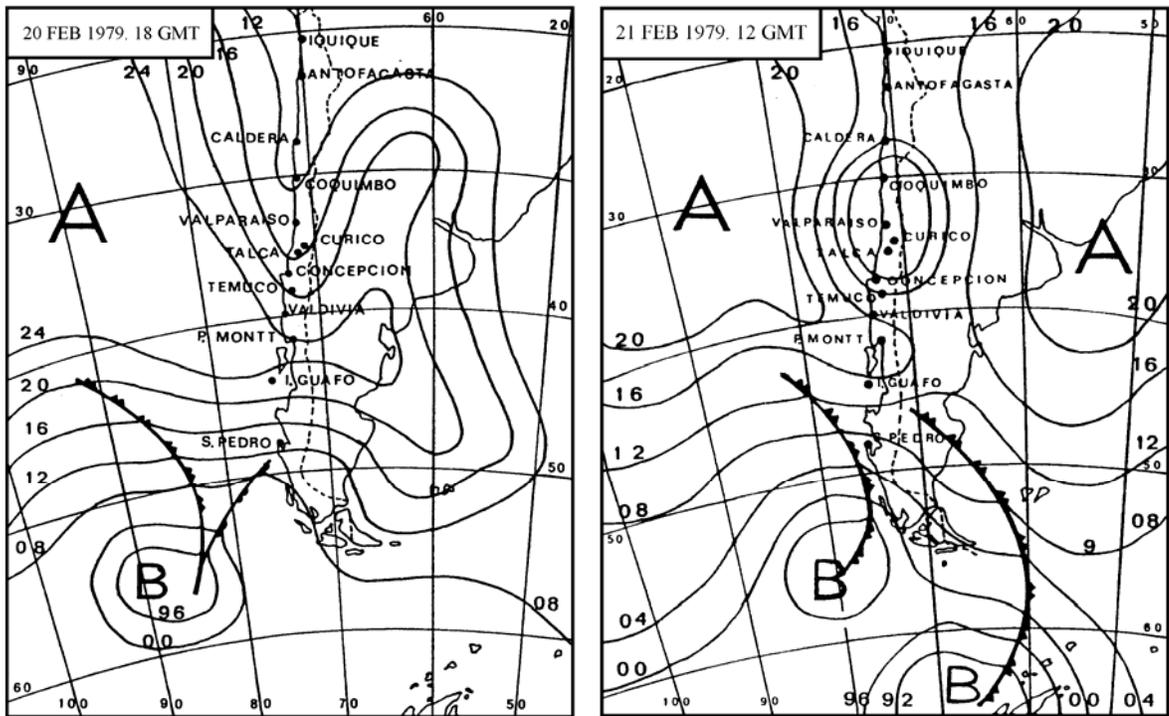


Figura 24: Cartas sinópticas registradas para el territorio chileno correspondientes al 20 y 21 de Febrero del año 1979, donde la letra A corresponde a las altas presiones y la letra B representa a las bajas presiones. (Fuente: Saavedra y Foppiano, 1992a).

Aunque en ocasiones las curvas de isobaras difieren significativamente de lo normal, su influencia no es importante cuando se calculan los valores medios mensuales de cualquier variable meteorológica. En consecuencia, ubicándose a una latitud al sur del Anticiclón del Pacífico, se observa sobre el continente una cuña de alta presión que penetra al litoral y que divide al territorio

en tres regiones meteorológicamente diferentes, los lugares pertenecientes a la cuña misma y las regiones al norte y al sur de la cuña (Saavedra y Foppiano, 1992a).

El comportamiento a lo largo del año de estos centros de acción meteorológicos permite explicar perfectamente bien las características fundamentales de los valores de la presión media mensual a lo largo de la región central de Chile. En esta línea de orientación, Saavedra (1985) a partir de las distribuciones medias mensuales de presión observadas a lo largo de Chile para el período 1911 a 1940 determinó la localización geográfica donde se ubican los valores máximos de presión media mensual en Chile, cuyo concepto fue denominado como Lugar de Presión Máxima (LPM) en Chile. La figura 25 muestra el ciclo anual de la distribución latitudinal del lugar de presión media mensual máxima en Chile.

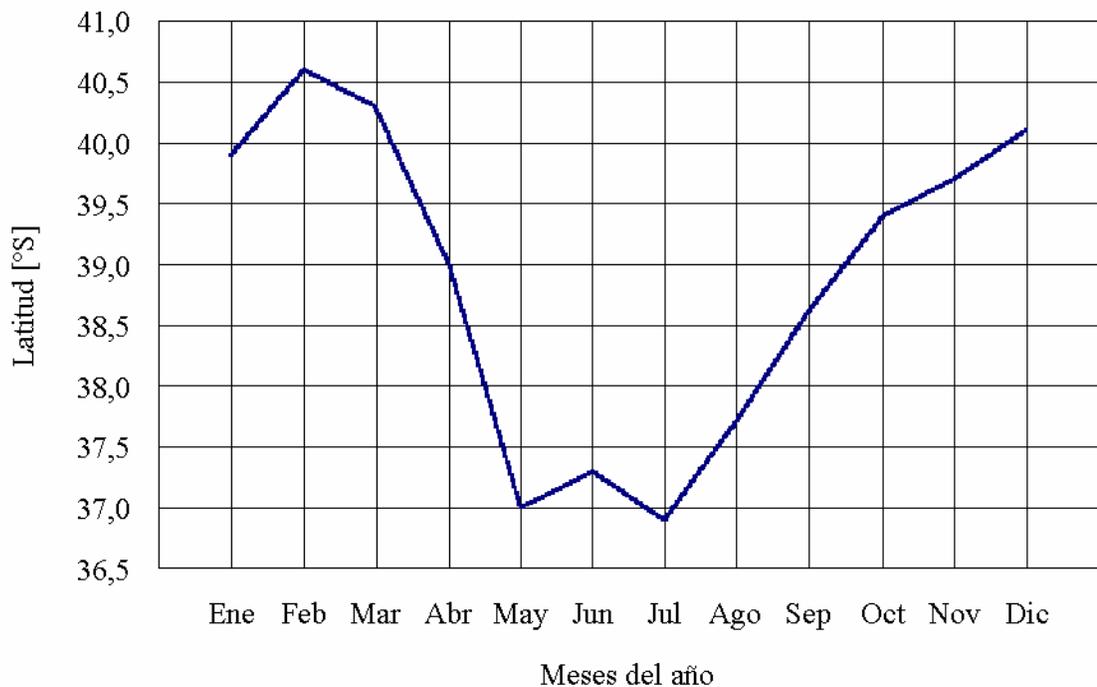


Figura 25: Ciclo anual de la distribución latitudinal del lugar de presión media mensual máxima en Chile. (Fuente: Parra y Morales, 1994).

El informe meteorológico en Chile describe que el buen tiempo se encuentra en las áreas que están bajo el dominio de la Depresión Continental, resultado que se debe a la interacción entre

el Anticiclón del Pacífico y el límite continental. Consecuentemente, la región puede ser considerada bajo el dominio del Anticiclón del Pacífico, donde prevalecen los vientos que soplan desde el sur, cielos claros y falta de lluvias. La Profundización de la Depresión Continental ocurre solo esporádicamente, usualmente dos veces al mes durante el verano. Como una sombra y localizado bajos núcleos cálidos, se producen vientos con direcciones cambiantes solo en localidades cercanas, acompañados rara vez por nubosidad y muy acasionalmente produciendo alguna llovizna. Por otro lado, el mal tiempo está relacionado al dominio de las Bajas Polares, la cual está asociada con el frente polar. En este caso, los vientos soplan desde el norte, los cielos están nublados y la probabilidad de fuertes precipitaciones es bastante alta (Saavedra y Foppiano, 1992b).

Asumiendo que un escenario climático puede ser predicho manteniendo el mismo pronóstico meteorológico mencionado anteriormente, la localización de la presión media mensual máxima en Chile (LPM) puede ser utilizada como un punto que divide el territorio chileno en dos regiones meteorológicamente distintas. Las regiones ubicadas al sur del LPM estarían caracterizadas por lo que se llama subjetivamente mal tiempo, es decir, suficientes precipitaciones, días nublados a cubiertos y escasas horas de Sol. En cambio, las regiones ubicadas al norte del LPM estarían caracterizadas por buen tiempo, es decir, escasas precipitaciones, días parciales a despejados y suficientes horas de Sol. En este sentido y perteneciente a la cuña misma, se define al LPM como el lugar latitudinal de presión máxima en Chile, que deja al sur las Bajas Polares y al norte la Depresión Continental (DC) y/o la Profundización de la Depresión Continental. Además el LPM puede ser considerado como un índice de la interacción media mensual de los centros de acción meteorológicos (Saavedra y Foppiano, 1992c).

La cuantificación de la nubosidad resulta ser una variable de gran interés para las ciencias relacionadas con el estudio de la meteorología, así como para las diversas aplicaciones de la energía solar. Esta variable puede ser determinada a través de observación directa cuya unidad de medida suele ser en décimas o en octas (octavos) de cielo cubierto. Sin embargo, considerando la nubosidad una variable climática, diversos investigadores han abocado esfuerzos en la búsqueda de indicadores adecuados que permitan la descripción cuantitativa de esta variable climática (Iqbal, 1983).

En este sentido, Saavedra (1985) destaca el rol de descriptor que juega el Lugar de Presión Máxima para diversas variables climatológicas tales como la frecuencia de vientos norte y suroeste, la radiación solar, las horas de Sol, la nubosidad y la frecuencia de lluvias para Concepción, considerando a cada una de ellas como variables dependientes linealmente y exclusivamente de la posición del lugar de presión media mensual máxima en Chile. A partir de esta descripción, se desarrolló una expresión matemática entre el valor de las respectivas variables climáticas analizadas con respecto a la evolución anual del Lugar de Presión Máxima del siguiente tipo (Ec. 45).

$$y = A + B \cdot x \quad \text{Ec. 45}$$

Donde el coeficiente y es el valor de la respectiva variable climática analizada, el coeficiente x es la posición latitud del LPM expresada en porcentajes de exceso o defecto relativo a la latitud de Concepción y las variables A y B corresponden a constantes relacionadas con la regresión lineal.

Suponiendo que las variables climáticas en media mensual frecuencia de vientos norte y suroeste, radiación solar, insolación y nubosidad dependen linealmente del ciclo anual que presenta el Lugar de Presión Máxima, Parra y Morales (1994) elaboraron la recta de regresión que mejor representaba al conjunto de valores de estas variables climáticas en función de la posición latitudinal media mensual del LPM referida a la localidad de Concepción.

En ambos casos de estudio, se destaca a la nubosidad como una de las variables climatológicas que mejor obedece a la bondad de ajuste del Lugar de Presión Máxima, a pesar de que la nubosidad es catalogada como una medida subjetiva desde el punto de vista observacional.

Coefficiente de transparencia de la atmósfera

Como la estructura físico matemática de los procesos que ocurren entre la atmósfera y la radiación solar es muy compleja, es posible simular la magnitud de estos procesos a través de una serie de variables, donde la más utilizada corresponde al coeficiente de transparencia. En términos generales, el coeficiente de transparencia K representa la fracción de energía solar que ingresa a la

superficie terrestre después que el haz de pequeñas partículas atraviesa la unidad de espesor del medio atmosférico (Liou, 1980). Según esta definición, una expresión simple para determinar el comportamiento de esta variable sería a través del cociente entre la radiación solar que ingresa a la superficie terrestre y la radiación solar que llega al exterior de la Tierra, tal como lo indica la siguiente ecuación (Ec. 46).

$$K = \frac{R_g}{R_e} \quad \text{Ec. 46}$$

En la ecuación anterior, R_g es la radiación solar global medida sobre la superficie y R_e corresponde a la radiación solar extraterrestre calculada a partir de fórmulas astronómicas. Gracias a los estudios que se han ido desarrollando en las últimas décadas, se sabe que existe una relación entre el coeficiente de transparencia de la atmósfera y la cobertura nubosa. A través de esta dependencia se han establecido varias expresiones que determinan de manera bastante apropiada este coeficiente. Una de ellas es conocida como la ecuación de Black, la cual fue desarrollada utilizando datos de nubosidad de varias partes del mundo, y se representa a través de la siguiente ecuación cuadrática (Ec. 47) (Iqbal, 1983).

$$K = 0.803 - 0.340 \cdot C - 0.458 \cdot C^2 \quad \text{Ec. 47}$$

Donde la variable "C" representa la nubosidad en décimos. Mediante esta expresión es posible observar que el coeficiente de transparencia "K" representa un valor alto mientras la atmósfera está mayormente despejada. Por el contrario, cuando se obtiene un valor de coeficiente de transparencia "K" bajo se debe a la presencia de nubosidad atmosférica en el ambiente (De Francisco y Castillo, 1985).

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 número de moléculas que un rayo solar intersecta antes de llegar a la superficie de la Tierra es proporcional a la distancia que tienen que atravesar los rayos solares para llegar definitivamente 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).

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 bajo el término de masa óptica, aunque también es conocida como espesor óptico o espesor atmosférico, obteniéndose a través de la siguiente expresión (Ec. 48).

$$m = \int_0^{\infty} \rho \cdot ds \quad \text{Ec. 48}$$

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 ρ 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 zenith, la trayectoria longitudinal de los rayos solares presenta una dirección directamente de manera 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 (Ec. 49).

$$m_v = \int_0^{\infty} \rho \cdot dz \quad \text{Ec. 49}$$

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 ρ 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).

De esta manera, 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 zenith. La masa óptica relativa (m_r) 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 zenith, tal como se describe en la siguiente expresión (Ec. 50).

$$m_r = \frac{\int_0^{\infty} \rho \cdot ds}{\int_0^{\infty} \rho \cdot dz} \quad \text{Ec. 50}$$

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 (Ec. 51) (Lissi y Sanhueza, 1996).

$$m_r = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad \text{Ec. 51}$$

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°, error que aumenta a 10% para un ángulo de incidencia igual a 85°. En consecuencia, para ángulos de elevación mayores a 10° los efectos de la refracción en la atmósfera son despreciables, en este caso, la masa óptica relativa viene dada por la siguiente ecuación (Ec. 52) (Iqbal, 1983).

$$m_r = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1}{\cos \theta_z} \quad \text{Ec. 52}$$

Donde P es la presión atmosférica en el lugar de observación y P₀ 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 (Ec. 53).

$$\frac{P}{P_0} = e^{[-0,0001184 \cdot z]} \quad \text{Ec. 53}$$

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 y mencionado anteriormente corresponde a la transmisividad (τ), concepto definido como la fracción de energía incidente a una longitud de onda dada que es transmitida por un determinado medio. La atmósfera terrestre, junto con los elementos que la componen, 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 e incide sobre la superficie de la Tierra (Campbell, 1995).

Si bien el objetivo fundamental de la atmósfera terrestre es mantener la vida en la Tierra, la capacidad que presenta de transmitir parte de la radiación solar a la superficie terrestre, permite que la variación de las temperaturas entre el día y la noche no sean demasiado extremas, manteniendo una temperatura adecuada sobre la Tierra e impidiendo los cambios bruscos.

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 del flujo de energía solar incidente en la superficie terrestre. 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 que ocurren en el medio ambiente. De modo 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 la transmisividad de la atmósfera es necesario considerar el coeficiente de transparencia de la atmósfera y el espesor atmosférico, ambas variables mencionadas anteriormente. En este sentido, matemáticamente se han desarrollado ciertas expresiones a través de las cuales es posible obtener la transmisividad de la atmósfera 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 (Ec. 54) (Campbell, 1995).

$$\tau = e^{[-K \cdot m]} \quad \text{Ec. 54}$$

Donde τ representa la transmisividad de la atmósfera, K es el coeficiente de transparencia y m corresponde al espesor atmosférico. No obstante, existe una expresión mucho más simple que explica la transmisividad de la atmósfera a través de la siguiente ecuación (Ec. 55).

$$\tau = K^m \quad \text{Ec. 55}$$

Donde τ es la transmisividad de la atmósfera, K representa al coeficiente de transparencia y m es el espesor atmosférico (Iqbal, 1983).

Cálculo de la radiación solar extraterrestre

Para entender el cálculo de la radiación solar extraterrestre es conveniente introducir algunos conceptos básicos que ayudarán a simplificar y comprender la nomenclatura utilizada y su significado físico. En este sentido es necesario considerar dos términos, denominados irradiancia solar extraterrestre e irradiación solar extraterrestre, que por lo general suelen ser confundidos, a pesar de que sus respectivos significados son estrictamente distintos.

La irradiancia solar extraterrestre R_e es definida como la energía incidente sobre la unidad de superficie en el borde exterior de la atmósfera en la unidad de tiempo, cuya unidad normalmente empleada es el $[W m^{-2}]$. Por otro lado, la irradiación solar extraterrestre es la energía recibida por la unidad de superficie en el borde exterior de la atmósfera durante un período de tiempo determinado y se obtiene integrando el valor de la irradiancia solar extraterrestre a lo largo de dicho período de tiempo (Cañada y Salvador, 1997).

Si el período de tiempo corresponde a una hora, la irradiación solar extraterrestre se representa por la letra I_e , donde la unidad habitualmente utilizada es el $[W m^{-2} h^{-1}]$. En tanto que, si dicho período corresponde a un día, la irradiación solar extraterrestre se representa por la letra H_e , en cuyo caso la unidad aplicada comúnmente es el $[W m^{-2} día^{-1}]$.

Sin embargo, existen ciertas fórmulas matemáticas desarrolladas para determinar tanto la irradiancia solar extraterrestre como la irradiación solar extraterrestre en varias orientaciones y para diferentes períodos de tiempo, obteniendo valores integrados del espectro de radiación electromagnética sobre todas las longitudes de onda, las cuales son explicadas a continuación.

Radiación solar extraterrestre sobre superficie horizontal

La irradiancia solar extraterrestre sobre un plano horizontal está en función de las relaciones astronómicas y trigonométricas mencionadas anteriormente dentro de las cuales es necesario considerar la distancia entre el Sol y la Tierra, la latitud geográfica, el ángulo horario y la

declinación solar. De modo que, el valor de la irradiancia para este tipo de superficie se obtiene a través de la siguiente expresión (Ec. 56).

$$R_{eh} = I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_z \quad \text{Ec. 56}$$

Donde R_{eh} corresponde a la irradiancia solar extraterrestre sobre un plano horizontal, I_{sc} es la constante solar, E_0 representa el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre y θ_z es el ángulo zenit medido en grados para una superficie horizontal. Sin embargo, para ciertas aplicaciones relacionadas con este tipo de superficie es frecuentemente necesario contar con los valores de radiación solar para un período de tiempo determinado, como una hora o un día. En ambos casos se considera la irradiancia solar extraterrestre sobre un plano horizontal integrada para los respectivos períodos de tiempo (Liou, 1980).

La irradiación solar extraterrestre para una superficie horizontal a lo largo de una hora se obtendrá integrando la irradiancia solar extraterrestre para un plano horizontal R_{eh} durante dicho intervalo de tiempo, tal como se define en la siguiente expresión (Ec. 57 y Ec. 58).

$$I_{eh} = \int_{t_1}^{t_2} I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_z \cdot dt \quad \text{Ec. 57}$$

$$I_{eh} = I_{sc} \cdot E_0 \cdot \left[\begin{array}{l} \text{sen } \delta \cdot \text{sen } \phi \cdot (t_2 - t_1) + \\ \frac{12}{\pi} \cdot \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot [\text{sen}(15 \cdot t_1) - \text{sen}(15 \cdot t_2)] \end{array} \right] \quad \text{Ec. 58}$$

Donde I_{eh} corresponde a la irradiación solar extraterrestre horaria sobre un plano horizontal, I_{sc} es la constante solar, E_0 representa el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre, t_1 es la hora solar correspondiente al principio del intervalo de cálculo y t_2 corresponde a la hora solar al final del intervalo de cálculo. En este caso, tanto t_1 como t_2 son medidas a partir de medianoche, es decir, de las 0 horas hasta las 24 horas, de este modo, para calcular la irradiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal entre las 3 y las 4 de la tarde se consideraría t_1 igual a las 15 horas y t_2 igual a las 16 horas. Esta expresión permite además, el cálculo de la

irradiación solar extraterrestre en períodos de tiempo distintos de una hora sobre una superficie horizontal (Cañada y Salvador, 1997).

La irradiación solar extraterrestre para una superficie horizontal a lo largo de un día se obtendrá integrando la irradiancia solar extraterrestre para un plano horizontal R_{eh} durante dicho intervalo de tiempo, tal como se define en la siguiente expresión (Ec. 59 y Ec. 60).

$$H_{eh} = \int_{\omega_{srh}}^{\omega_{ssh}} I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_z \cdot d\omega_h \quad \text{Ec. 59}$$

$$H_{eh} = \frac{24}{\pi} \cdot I_{sc} \cdot E_0 \cdot \left[\begin{array}{l} \text{sen } \delta \cdot \text{sen } \phi \cdot \omega_h \cdot \frac{\pi}{180} + \\ \text{cos } \delta \cdot \text{cos } \phi \cdot \text{sen } \omega_h \end{array} \right] \quad \text{Ec. 60}$$

Donde H_{eh} es la irradiación solar extraterrestre diaria sobre un plano horizontal, I_{sc} representa a la constante solar, E_0 es el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre, ω_{srh} corresponde al ángulo horario a la salida del Sol, ω_{ssh} es el ángulo horario a la puesta del Sol y ω_h representa al ángulo horario medido en grados para una superficie horizontal (Iqbal, 1983).

Radiación solar extraterrestre sobre superficie orientada arbitrariamente

La irradiancia solar extraterrestre sobre un plano orientado arbitrariamente está en función de las relaciones astronómicas y trigonométricas, además de las variables correspondientes a la topografía característica de la superficie terrestre, cada una de las cuales fue mencionada anteriormente. Dentro de esta dependencia es necesario considerar la distancia entre el Sol y la Tierra, la latitud geográfica, el ángulo horario, la declinación solar, la pendiente y la orientación. De modo que, el valor de la irradiancia para este tipo de superficie está dada por la siguiente expresión (Ec. 61).

$$R_{ea} = I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_a \quad \text{Ec. 61}$$

Donde R_{ea} corresponde a la irradiancia solar extraterrestre sobre un plano orientado arbitrariamente, I_{sc} es la constante solar, E_0 representa el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre y θ_a es el ángulo de incidencia medido en grados para una superficie orientada arbitrariamente. No obstante, para algunas aplicaciones relacionadas con este tipo de superficie se han desarrollado ciertas expresiones que determinan los valores de radiación solar para un período de tiempo determinado, como una hora o un día. En ambos casos se considera la irradiancia solar extraterrestre sobre un plano orientado arbitrariamente integrada para los respectivos períodos de tiempo (Liou, 1980).

La irradiación solar extraterrestre para una superficie orientada en un azimuth γ a lo largo de una hora se obtendrá integrando la irradiancia solar extraterrestre para un plano orientado arbitrariamente R_{ea} durante dicho intervalo de tiempo, la cual está dada por la siguiente expresión (Ec. 62 y Ec. 63).

$$I_{ea} = \int_{\omega_{a1}}^{\omega_{a2}} I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_a \cdot d\omega_a \quad \text{Ec. 62}$$

$$I_{ea} = I_{sc} \cdot E_0 \cdot \left[\begin{array}{l} \text{sen } \delta \cdot (\text{sen } \phi \cdot \text{cos } \beta - \text{cos } \phi \cdot \text{sen } \beta \cdot \text{cos } \gamma) + \\ \text{cos } \delta \cdot \text{cos } \omega_{ai} \cdot (\text{cos } \phi \cdot \text{cos } \beta + \text{sen } \phi \cdot \text{sen } \beta \cdot \text{cos } \gamma) + \\ \text{cos } \delta \cdot \text{sen } \beta \cdot \text{sen } \gamma \cdot \text{sen } \omega_{ai} \end{array} \right] \quad \text{Ec. 63}$$

Donde I_{ea} corresponde a la irradiación solar extraterrestre horaria sobre un plano orientado arbitrariamente, I_{sc} es la constante solar, E_0 representa el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre, ω_{a1} es el ángulo horario correspondiente al principio del intervalo de cálculo, ω_{a2} corresponde al ángulo horario al final del intervalo de cálculo y ω_{ai} es el ángulo horario medido a la mitad del intervalo de cálculo considerado. En este caso, tanto ω_{a1} como ω_{a2} son medidas a partir de medianoche, es decir, de las 0 horas hasta las 24 horas, de este modo, para calcular la irradiación solar extraterrestre sobre una superficie orientada arbitrariamente entre las 10 y las 11 de la mañana, se consideraría ω_{a1} igual a 30° y ω_{a2} igual a 15° , en tanto que ω_{ai} sería igual a $22,5^\circ$ (Cañada y Salvador, 1997).

La irradiación solar extraterrestre para una superficie orientada en un azimuth γ a lo largo de un día se obtendrá integrando la irradiancia solar extraterrestre para un plano orientado arbitrariamente R_{ea} durante dicho intervalo de tiempo, la cual está dada por la siguiente expresión (Ec. 64 y Ec. 65).

$$H_{ea} = \int_{\omega_{sra}}^{\omega_{ssa}} I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos\theta_a \cdot d\omega_a \quad \text{Ec. 64}$$

$$H_{ea} = \frac{12}{\pi} \cdot I_{sc} \cdot E_0 \cdot \left[\begin{array}{l} \cos\beta \cdot \sin\delta \cdot \sin\phi \cdot |\omega_{ssa} - \omega_{sra}| \cdot \frac{\pi}{180} - \\ \sin\delta \cdot \cos\phi \cdot \sin\beta \cdot \cos\gamma \cdot |\omega_{ssa} - \omega_{sra}| \cdot \frac{\pi}{180} + \\ \cos\phi \cdot \cos\delta \cdot \cos\beta \cdot |\sin\omega_{ssa} - \sin\omega_{sra}| + \\ \cos\delta \cdot \cos\gamma \cdot \sin\phi \cdot \sin\beta \cdot |\sin\omega_{ssa} - \omega_{sra}| + \\ \cos\delta \cdot \sin\beta \cdot \sin\gamma \cdot |\cos\omega_{ssa} - \cos\omega_{sra}| \end{array} \right] \quad \text{Ec. 65}$$

Donde H_{ea} es la irradiación solar extraterrestre diaria sobre un plano orientado arbitrariamente, I_{sc} representa a la constante solar, E_0 es el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre, ω_{sra} corresponde al ángulo horario a la salida del Sol, ω_{ssa} es el ángulo horario a la puesta del Sol, ω_a representa al ángulo horario medido en grados para una superficie orientada arbitrariamente y el signo $| |$ indica el valor absoluto de los términos que contiene en su interior (Iqbal, 1983).

Radiación solar extraterrestre sobre superficie orientada hacia el ecuador

La irradiancia solar extraterrestre sobre un plano orientado hacia el ecuador está en función de las relaciones astronómicas y trigonométricas, además de las variables correspondientes a la topografía característica de la superficie terrestre, cada una de las cuales fue mencionada anteriormente. Dentro de esta dependencia es necesario considerar la distancia entre el Sol y la Tierra, la latitud geográfica, el ángulo horario, la declinación solar, la pendiente y la orientación, en

cuyo caso el azimuth es exclusivamente igual a cero grados. De modo que, el valor de la irradiancia para este tipo de superficie se resuelve a partir de la siguiente expresión (Ec. 66).

$$R_{ee} = I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_e \quad \text{Ec. 66}$$

Donde R_{ee} corresponde a la irradiancia solar extraterrestre para una superficie orientada hacia el ecuador, I_{sc} es la constante solar, E_0 representa el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre y θ_e es el ángulo de incidencia medido en grados para una superficie orientada hacia el ecuador. Si bien, existen diversas expresiones relacionadas con este tipo de superficie, es frecuentemente necesario para ciertas aplicaciones contar con los valores de radiación solar para un período de tiempo determinado, como una hora o un día. En ambos casos se considera la irradiancia solar extraterrestre sobre un plano orientado hacia el ecuador integrada para los respectivos períodos de tiempo (Liou,1980).

La irradiancia solar extraterrestre para una superficie orientada en un azimuth de cero grados a lo largo de una hora se obtendrá integrando la irradiancia solar extraterrestre para un plano orientado hacia el ecuador R_{ee} durante dicho intervalo de tiempo, la cual se resuelve a partir de la siguiente expresión (Ec. 67 y Ec. 68).

$$I_{ee} = \int_{t_1}^{t_2} I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_e \cdot dt \quad \text{Ec. 67}$$

$$I_{ee} = I_{sc} \cdot E_0 \cdot \left[\begin{array}{l} \text{sen } \delta \cdot \text{sen}(\phi - \beta) \cdot (t_2 - t_1) + \\ \frac{12}{\pi} \cdot \cos \delta \cdot \cos(\phi - \beta) \cdot [\text{sen}(15 \cdot t_1) - \text{sen}(15 \cdot t_2)] \end{array} \right] \quad \text{Ec. 68}$$

Donde I_{ee} corresponde a la irradiancia solar extraterrestre horaria sobre un plano orientado hacia el ecuador, I_{sc} es la constante solar, E_0 representa el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre, t_1 es la hora solar correspondiente al principio del intervalo de cálculo y t_2 corresponde a la hora solar al final del intervalo de cálculo. En este caso, tanto t_1 como t_2 son

medidas a partir de medianoche, es decir, de las 0 horas hasta las 24 horas, naturalmente estas horas deben estar entre la puesta del Sol y la salida del Sol (Cañada y Salvador, 1997).

La irradiación solar extraterrestre para una superficie orientada en un azimuth de cero grados a lo largo de un día se obtendrá integrando la irradiancia solar extraterrestre para un plano orientado hacia el ecuador R_{ee} durante dicho intervalo de tiempo, la cual se resuelve a partir de la siguiente expresión (Ec. 69 y Ec. 70).

$$H_{ee} = \int_{\omega_{sre}}^{\omega_{sse}} I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_e \cdot d\omega_e \quad \text{Ec. 69}$$

$$H_{ee} = \frac{24}{\pi} \cdot I_{sc} \cdot E_0 \cdot \left[\begin{array}{l} \text{sen } \delta \cdot \text{sen}(\phi - \beta) \cdot \omega_e \cdot \frac{\pi}{180} + \\ \text{cos } \delta \cdot \text{cos}(\phi - \beta) \cdot \text{sen } \omega_e \end{array} \right] \quad \text{Ec. 70}$$

Donde H_{ee} es la irradiación solar extraterrestre diaria sobre un plano orientado hacia el ecuador, I_{sc} representa a la constante solar, E_0 es la distancia entre el Sol y la Tierra, ω_{sre} corresponde al ángulo horario a la salida del Sol, ω_{sse} es el ángulo horario a la puesta del Sol y ω_e representa al ángulo horario medido en grados para una superficie orientada hacia el ecuador (Iqbal, 1983).

Cálculo de la radiación solar global

Hasta el momento se han explicado las principales características de la radiación solar que llega al exterior de la atmósfera terrestre, no obstante, el aprovechamiento del recurso solar tiene lugar en la superficie terrestre. Es por esta razón que la atmósfera se convierte en uno de los principales factores que determina las características de la radiación solar al nivel de la Tierra. En los primeros 80 kilómetros de la atmósfera es donde transcurre la mayor parte de los fenómenos que convierten a esta capa gaseosa en un medio atenuador de la radiación solar. Los principales fenómenos que ocurren sobre la radiación solar debido a la composición de la atmósfera son la

absorción y la dispersión o scattering de la radiación solar. Los componentes de la atmósfera se convierten en nuevos emisores de energía cuando incide sobre ellos la radiación solar, de manera que parte de esta energía captada es de nuevo radiada en todas direcciones debido al fenómeno de dispersión. Por otra parte, los componentes de la atmósfera se pueden convertir en verdaderos sumideros de energía gracias al fenómeno de la absorción, proceso que origina distintas reacciones químicas con el fin de mantener el equilibrio atmosférico como es el caso del ciclo del ozono (Lissi y Sanhueza, 1996).

En consecuencia, cuando la radiación solar ingresa a la atmósfera terrestre, una parte de la energía incidente es eliminada por dispersión y otra por absorción. Ambos fenómenos influyen sobre el espectro de radiación solar extraterrestre modificando considerablemente el espectro de energía solar que pasa a través de la atmósfera, generando el flujo de energía correspondiente a la radiación solar global. Sin embargo, a nivel terrestre se generan en realidad dos flujos de energía distintos los cuales se clasifican como las respectivas componentes de la radiación solar global denominadas radiación solar directa y radiación solar difusa (Sarmiento, 1995).

La componente directa corresponde a la radiación solar global que no ha sido interferida por la atmósfera terrestre y que tiene una dirección perfectamente definida mediante la cual recorre una línea recta directamente desde el disco solar hasta incidir sobre el nivel del suelo de la superficie terrestre. En cambio, la componente difusa representa a la radiación solar global que ha sufrido procesos de dispersión por los componentes de la atmósfera y proviene de todos los puntos de la bóveda celeste. Una porción de la radiación solar difusa vuelve al espacio y otra porción incide sobre el nivel del suelo de la superficie terrestre (Cañada y Salvador, 1997).

Según los antecedentes mencionados anteriormente, el comportamiento de la radiación solar sobre la superficie terrestre estaría determinada a través de la siguiente expresión matemática (Ec. 71).

$$R_g = R_{dir} + R_{dif} \quad \text{Ec. 71}$$

Donde R_g es la radiación solar global, R_{dir} representa a la radiación solar directa y R_{dif} es la radiación solar difusa. Si bien, esta relación determina las características de disponibilidad de la radiación solar global en una localidad específica, este cálculo se puede realizar de manera directa instalando aparatos de medición debidamente calibrados y durante largos períodos de tiempo. Sin embargo, cuando lo anterior no es posible se recurre a los métodos computacionales o a los métodos empíricos, los cuales estiman el valor de la radiación solar global a partir de modelos estadísticos elaborados en base a datos de ciertas variables climáticas (Iqbal, 1983).

Métodos directos de estimación

Para ciertas condiciones astronómicas dadas, la variabilidad del estado atmosférico a lo largo de un determinado día es tan amplia que la radiación solar global puede estimarse procesando la información disponible sólo en términos estadísticos. De esta manera, se manejan valores medios observados de la radiación solar para la localización de interés. Sin embargo, para entender el cálculo de la radiación solar global es conveniente introducir algunos conceptos básicos que ayudarán a simplificar y comprender la nomenclatura utilizada y su significado físico. En este sentido es necesario considerar dos términos, denominados irradiancia solar global e irradiación solar global, que por lo general suelen ser confundidos, a pesar de que sus respectivos significados son estrictamente distintos (Campbell, 1995).

La irradiancia solar global R_g es definida como la energía incidente sobre la unidad de superficie terrestre en la unidad de tiempo, cuya unidad normalmente empleada es el $[W m^{-2}]$. Por otro lado, la irradiación solar global es la energía recibida por la unidad de superficie terrestre durante un período de tiempo determinado y se obtiene promediando el valor de la irradiancia solar global a lo largo de dicho período de tiempo (Cañada y Salvador, 1997).

Si el período de tiempo corresponde a una hora, la irradiación solar global se representa por la letra I_g , donde la unidad habitualmente utilizada es el $[W m^{-2} h^{-1}]$. En tanto que, si dicho período corresponde a un día, la irradiación solar global se representa por la letra H_g , en cuyo caso la unidad aplicada comúnmente es el $[W m^{-2} día^{-1}]$.

Cabe señalar que, los datos de irradiación horaria y diaria son normalmente utilizados en aquellos procesos de simulación de disponibilidad del recurso solar, en los cuales se requiere de un estudio exhaustivo para evaluar el comportamiento esperado. Estas simulaciones recurren principalmente a los valores medios de irradiación horaria y diaria, sin embargo, aunque los resultados pueden llegar a ser fiables, no se justifica normalmente el enorme caudal de información que es necesario manejar.

Sin embargo, generalmente se habla de la irradiación solar diaria para un mes determinado, lo cual debe entenderse como el valor de la radiación solar global calculado como el valor medio de los valores diarios de la radiación global durante dicho mes y durante varios años. En este sentido, existe una fórmula matemática sencilla desarrollada para determinar la irradiación solar global sobre una superficie horizontal durante un período de tiempo de un mes, obteniendo valores promediados del espectro de radiación electromagnética sobre todas las longitudes de onda. Por lo tanto, la irradiación solar global media mensual diaria multianual disponible en una determinada localidad se caracteriza por 12 promedios mensuales de radiación solar global diaria durante varios años (Iqbal, 1983).

Si bien, la metodología para la evaluación de la radiación solar global depende del tipo de información disponible, lo mejor es instalar un grupo de instrumentos capaces de medir la radiación solar global durante varios años. El pirheliómetro y el piranómetro corresponden a los aparatos comúnmente empleados en la medición de la radiación solar sobre la superficie terrestre. Los pirheliómetros son instrumentos empleados para medir la intensidad e incidencia normal de la radiación solar directa emitida por el disco solar. En cambio, los piranómetros son instrumentos empleados para medir la cantidad de la radiación solar global considerando tanto la componente directa como difusa (Sarmiento, 1995).

Métodos computacionales de estimación

En ausencia de datos directos de radiación solar global se suele recurrir a modelos físicos en los cuales la radiación solar global se calcula a partir del análisis de las variables astronómicas, trigonométricas, topográficas y atmosféricas. En este sentido, los métodos computacionales simulan

mediante modelos físicos las diferentes interacciones de la radiación solar con la atmósfera dentro de las cuales se destaca la dispersión, la absorción y la reflexión. A través de la utilización de los métodos computacionales es posible obtener resultados que revelan el comportamiento espacial de la radiación solar global en la superficie terrestre considerando el valor de las distintas variables analizadas a lo largo de un período determinado (Felicísimo, 1994).

Uno de los métodos computacionales de simulación más sencillos corresponde al ERHYM (Elakala Rangeland Hydrology and Yield Model) mediante el cual es posible simular el balance hídrico diario calculando un índice de rendimiento anual en función de la relación entre la transpiración real y la transpiración potencial. Dentro de este programa existe una rutina conocida como PINSOL.BAS la cual permite calcular la irradiación solar global diaria sobre superficies que presentan distintas pendientes y orientaciones suponiendo que no existe atmósfera (Wight, 1987).

Whiteman y Allwine (1986) describieron uno de los programas más conocidos desarrollado en FORTRAN, mediante el cual es posible determina el flujo de radiación solar extraterrestre total diario para un plano de la superficie con cierta inclinación, localizado en una latitud y longitud dada. Por otro lado, Donatelli *et al* (2002) explicaron el RadEst3.00, programa que permite estimar la radiación solar global diaria para una localidad dada mediante herramientas gráficas y estadísticas.

Métodos empíricos de estimación

Desde comienzos del siglo XX ha existido esfuerzos por establecer fórmulas simples, que permitan estimar la radiación solar global que incide sobre la superficie, a partir de la radiación solar extraterrestre y el estado de la atmósfera. Uno de los modelos más antiguos es de A. K. Angström (1924, citado por Castillo y Santibáñez, 1981) que estima la densidad de flujo diario de radiación global a partir de la siguiente regresión lineal simple (Ec. 72).

$$\frac{R_g}{R_e} = a + b \cdot \left(\frac{n}{N} \right) \quad \text{Ec. 72}$$

Donde R_g representa la radiación solar global, R_e es la radiación solar extraterrestre, n corresponde a las horas de sol real y N es la duración teórica del día. Además, los coeficientes "a" y "b" están asociados al tipo de nubes y a las condiciones generales que determinan la turbidez de la atmósfera. Angström, después de haber analizado estos coeficientes, sugirió los valores de 0,2 para el coeficiente "a" y de 0,5 para el coeficiente "b" (Castillo y Santibáñez, 1981).

Por otro lado, para estimar la radiación solar a través de un modelo estadístico, algunos autores han considerado el efecto que producen los rayos solares sobre la amplitud térmica. La diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas en un día determinado depende de la relación entre el calor sensible y el calor latente. El calor sensible varía de acuerdo a la radiación solar incidente y es responsable de las temperaturas máximas. Durante la noche, el calor sensible es perdido hacia el espacio como radiación en onda larga, disminuyendo así la temperatura del aire hasta su valor mínimo, valor que normalmente se alcanza antes del amanecer (Meza y Varas, 2000).

A partir de esta descripción, Bristow y Campbell (1984, citado por Meza y Varas, 2000) desarrollaron un modelo (Ec. 73) para estimar la radiación solar global en función de la radiación solar extraterrestre y la diferencia de temperaturas.

$$\frac{R_g}{R_e} = a \cdot \left(1 - e^{-b \cdot (T_{\max} - T_{\min})^c} \right) \quad \text{Ec. 73}$$

Donde R_g representa la radiación solar global, R_e es la radiación solar extraterrestre, T_{\max} corresponde a la temperatura máxima y T_{\min} es la temperatura mínima. Además, los valores descritos para cada coeficiente son de 0,7 para el coeficiente "a", entre 0,004 y 0,010 para el coeficiente "b" y 2,4 para el coeficiente "c" (Meza y Varas, 2000).

La diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima del aire está relacionada con el grado de cobertura nubosa en una localidad. En condiciones de cielo despejado suceden altas temperaturas durante el día (T_{\max}) porque la atmósfera es transparente a la radiación solar incidente, y bajas temperaturas durante la noche (T_{\min}) porque la poca radiación de onda larga saliente es absorbida por la atmósfera. Por el contrario, en condiciones de cielo cubierto, la temperatura

máxima es relativamente más pequeña porque una parte significativa de la radiación solar incidente nunca alcanza la superficie terrestre y es absorbida y reflejada por la nubosidad. Similarmente, la temperatura mínima será relativamente más alta mientras la cobertura nubosa actúe como una capa y decrece el total de radiación de onda larga saliente. Por lo tanto, la diferencia entre la temperatura máxima y mínima del aire puede ser utilizada como un indicador de la fracción de radiación solar extraterrestre que alcanza la superficie terrestre (Allen *et al*, 1998).

Este principio fue utilizado por Hargreaves y Samani (1982, citado por Allen *et al*, 1998) para diseñar un modelo de estimación (Ec. 74) de la radiación solar global en función de la radiación solar extraterrestre y la temperatura del aire, el cual fue ajustado y validado para algunas estaciones meteorológicas en una variedad de condiciones climáticas.

$$\frac{R_g}{R_e} = K_{rs} \cdot \sqrt{(T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})} \quad \text{Ec. 74}$$

Donde R_g representa la radiación solar global, R_e es la radiación solar extraterrestre, K_{rs} simboliza el coeficiente de ajuste, $T_{\text{máx}}$ corresponde a la temperatura máxima y $T_{\text{mín}}$ es la temperatura mínima. Según Allen *et al* (1998), la raíz cuadrada de la diferencia de temperatura está estrechamente relacionada a la existencia diaria de radiación solar en una localidad determinada. En este caso, el coeficiente de ajuste (K_{rs}) es empírico y varía de acuerdo a regiones ubicadas en el interior o en la costa.

Para localidades del interior, donde dominan las grandes extensiones de tierra y las masas de aire no están fuertemente influenciadas por un gran cuerpo de agua, el coeficiente de ajuste (K_{rs}) es 0,16 aproximadamente. En cambio, para localidades costeras, situadas en o próximas a la costa de una gran extensión de tierra y donde las masas de aire están influenciadas por un cuerpo de agua cercano, el coeficiente de ajuste (K_{rs}) es 0,19 aproximadamente (Allen *et al*, 1998).

Considerando el modelo de estimación diseñado por Hargreaves y Samani (Ec. 74), Allen (1995, citado por Meza y Varas, 2000) sugirió la obtención del coeficiente de ajuste (K_{rs}) utilizado

por Hargreaves y Samani a través de una fórmula matemática (Ec. 75) como una función de la presión atmosférica.

$$K_{rs} = K_{ra} \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0,5} \quad \text{Ec. 75}$$

Donde K_{rs} representa el coeficiente de ajuste utilizado por Hargreaves y Samani, K_{ra} es el coeficiente de ajuste propuesto por Allen, P corresponde a la presión atmosférica del lugar y P_0 es la presión atmosférica a nivel del mar la cual equivale a 101,3 [k Pa]. A partir de esta explicación, Allen (1997, citado por Meza y Varas, 2000) propuso la utilización del siguiente modelo (Ec. 76) para estimar la radiación solar global en función de la radiación solar extraterrestre, la presión atmosférica y la temperatura del aire.

$$\frac{R_g}{R_e} = K_{ra} \cdot \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0,5} \cdot (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0,5} \quad \text{Ec. 76}$$

Donde R_g representa la radiación solar global, R_e es la radiación solar extraterrestre, K_{ra} simboliza el coeficiente de ajuste propuesto por Allen, $T_{\text{máx}}$ corresponde a la temperatura máxima y $T_{\text{mín}}$ es la temperatura mínima, P corresponde a la presión atmosférica del lugar y P_0 es la presión atmosférica a nivel del mar la cual equivale a 101,3 [k Pa]. En este caso, los valores definidos para el coeficiente de ajuste K_{ra} corresponden a 0,17 para aquellas localidades ubicadas en la zona del interior y de 0,20 para aquellas localidades ubicadas en la zona costera (Meza y Varas, 2000).

Aplicación mundial de los modelos

Desde comienzos del siglo XX se han desarrollado estudios que establecen ciertas relaciones entre algunas variables meteorológicas como es el caso de la insolación con las mediciones de temperatura, viento, nieve, horas de sol, nubosidad, presión, precipitación, humedad relativa y la cantidad y el tipo de nubes. Sin embargo, gracias a estos estudios se ha podido

demostrar que el mejor predictor de la insolación son las horas de sol (Saavedra y Foppiano, 1992b).

Uno de los aportes más importante realizado en materia de radiación solar fue hecho por Huber (1977a, 1977b), cuando cartografió y analizó los principales antecedentes climatológicos registrados en Chile, datos que posteriormente fueron aplicados en la determinación de la productividad de la vegetación natural. Mediante esta cartografía se obtuvo la distribución espacial de la radiación solar global anual considerando los factores de latitud, altitud y nubosidad que la determinan.

Con el propósito de evaluar la disponibilidad de radiación solar en Chile, Castillo y Santibáñez (1981) aplicaron fórmulas empíricas de tipo Angström como estimadores de radiación solar global en 18 localidades chilenas. De dicho análisis se observó que las ecuaciones obtenidas no eran generalizables para todo el territorio chileno, por esta razón se establecieron fórmulas para cada localidad. Además encontraron una relación entre la nubosidad y el valor calculado de la heliofonía (horas de sol real) en 17 estaciones a lo largo del territorio chileno determinada por la siguiente ecuación (Ec. 77).

$$\left[\frac{n}{N}\right] = 0.85 - 0.020 \cdot C - 0.011 \cdot C^2 \quad \text{Ec. 77}$$

Bindi y Miglietta (1991) estimaron la radiación solar global diaria a partir de las mediciones de la temperatura del aire y de la lluvia caída en 22 estaciones meteorológicas de distintos países. El modelo que presentaron fue capaz de identificar aquellos días que presentaban una alta probabilidad de que el cielo este completamente claro o completamente cubierto considerando las observaciones de temperatura y precipitación. A partir de estos resultados se pudo estimar el promedio de transparencia del cielo para todos los días. Finalmente se calculó la radiación solar global diaria como una función de la transparencia del cielo y de la radiación solar extraterrestre obtenida mediante fórmulas astronómicas.

Antonioletti (1992) estimó la radiación solar global en las zonas áridas y semiáridas de Chile utilizando fórmulas empíricas de tipo Angström. En este estudio se determinaron tres áreas climáticas que fueron, la zona de clima desértica marítima (Sc), la zona de clima desértica interior (Si) y la zona de clima mediterráneo (M). Para cada una de estas zonas se desarrolló una ecuación diferente, obteniéndose fórmulas de estimación de la radiación solar para las zonas de clima desértica marítima (Ec. 78), desértica interior (Ec. 79) y mediterráneo (Ec. 80).

$$\left[\frac{R_g}{R_e}\right] (\text{Sc}) = 0.274 + 0.420 \cdot \left(\frac{n}{N}\right) \quad \text{Ec. 78}$$

$$\left[\frac{R_g}{R_e}\right] (\text{Si}) = 0.382 + 0.369 \cdot \left(\frac{n}{N}\right) \quad \text{Ec. 79}$$

$$\left[\frac{R_g}{R_e}\right] (\text{M}) = 0.171 + 0.516 \cdot \left(\frac{n}{N}\right) \quad \text{Ec. 80}$$

Meza y Varas (2000) evaluaron el comportamiento en Chile del modelo de Bristow-Campbell (Ec. 73) y del modelo de Allen (Ec. 76), ambos basados en las diferencias de temperaturas, y compararon los resultados obtenidos con el modelo de Angström (Ec. 72) basado en las horas de sol. Este estudio determinó la variación de la temperatura del aire como un estimador adecuado del promedio mensual de radiación solar global en las diferentes regiones climáticas de Chile.

Flores y Baldasano (2001) y Flores *et al* (2002) desarrollaron un modelo estadístico para determinar la radiación solar global en Cataluña y en las Islas Baleares a través de imágenes satelitales NOAA AVHRR, las cuales presentan una amplia cobertura conjuntamente con una adecuada resolución espacial. En este estudio se realizó un procedimiento de detección de nubes, determinando el índice de nubosidad para cada píxel de la imagen de satélite, datos que posteriormente se utilizaron para la aplicación del modelo estadístico.

Información meteorológica nacional

Los datos más comunes de radiación solar terrestre registrados en las diferentes regiones del mundo son valores promedios de radiación total, diaria, mensual, anual y para superficie horizontal. En Chile existen 89 estaciones que poseen piranógrafos (instrumento que mide la radiación solar global) y 113 estaciones con heliógrafos (instrumento que mide las horas de sol) en diferentes instalaciones meteorológicas de ENDESA y del Ministerio de Obras Públicas. Además, existe un registro de las mediciones realizadas por la gran mayoría de las estaciones meteorológicas a nivel nacional conocido como el Archivo Nacional de Evaluaciones Solarimétricas, el cual se encuentra en la Casa Central de la Universidad Técnica Federico Santa María, en Valparaíso (Sarmiento, 1995).

La Oficina Meteorológica de Chile (1965), con el propósito de elaborar y dar a conocer la climatología de Chile, publicó los datos de la climatología nacional considerando un período de mediciones de 30 años, para 36 estaciones seleccionadas. Por otro lado, la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997), desarrollaron un nuevo instrumento de información técnica que contenía un catastro de las estaciones meteorológicas localizadas a nivel nacional, privilegiando aquellas estaciones que disponían con información de cuatro o más años de registro.

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales

El modelo de estimación de la distribución espacial de la radiación solar global media mensual que se elaboró en esta memoria, fue implementado en Chile Central, considerando la zona continental que va desde la IV Región de Coquimbo hasta la IX Región de la Araucanía. Esta área de estudio reúne la mayor concentración poblacional del país y presenta favorables condiciones geográficas y climáticas que permiten el buen desarrollo de los principales sectores productivos nacionales.

Característica geográfica de la zona de estudio

En la topografía característica de esta zona de estudio predomina el suelo montañoso distinguiéndose un relieve cuya estructura general está constituida principalmente por cuatro grandes zonas en sentido longitudinal en el territorio chileno continental conocidas como la cordillera de los Andes, la depresión intermedia, la cordillera de la Costa y las planicies costeras, cada una de las cuales presentan ciertas variaciones a lo largo de la zona de estudio. Desde el extremo norte hacia el extremo sur del país, la cordillera de los Andes va descendiendo gradualmente, formando en la zona de estudio una montaña maciza, descubierta y erosionada con profundos valles labrados por la acción glacial (Vial y Hernández, 1985).

La depresión intermedia se desarrolla teniendo por límite oriental la cordillera de los Andes y por margen occidental la cordillera de la Costa, no obstante, pierde su continuidad en el extremo norte de la zona de estudio estructurándose en un conjunto de cuencas aisladas por cordones montañosos que se desprenden de los Andes, entre los cuales fluyen los principales ríos que riegan los valles centrales. Al sur de Chacabuco, la depresión intermedia comienza con dos cuencas claramente individualizadas, para luego abrirse al sur de Pelequén presentando el aspecto de una

planicie suavemente ondulada, plana en algunos sectores e intensamente regada. Estas características cambian al sur del río Biobío, donde la topografía de la depresión intermedia es fuertemente ondulada y los ríos se profundizan enérgicamente.

En el extremo norte de la zona de estudio hasta el río Aconcagua, la cordillera de la Costa aparece despedazada por la actividad erosiva y se confunde con los cordones transversales, dejando algunas planicies costeras más amplias y prolongadas. No obstante, renace vigorosamente en la provincia de Valparaíso recuperando altura con los claros rasgos andinos, y se presenta como una montaña maciza y continua. A partir del río Rapel hacia el sur la cordillera de la Costa se hunde notablemente presentándose como un relieve de colinas dominado por la erosión. Inmediatamente al sur del río Biobío vuelve a levantarse adquiriendo nombre propio a través de la llamada cordillera de Nahuelbuta, constituyendo un macizo continuo hasta el río Toltén (Fredes, 1993).

Las planicies costeras, que se desarrollan entre la cordillera de la Costa y la orilla del mar, tienen forma de terraza producto de la acción marina, y su número y amplitud cambian de un lugar a otro. Desde el extremo norte hacia el extremo sur del país, las planicies costeras aumentan en amplitud y penetran profundamente al continente a través de los valles transversales. A partir de la desembocadura del río Aconcagua se destacan en altura siendo cada vez más amplias, no obstante, desde Constitución hacia el sur, las planicies son muy reducidas y se estrechan, adquiriendo nuevamente importancia frente al Golfo de Arauco. Al sur del río Imperial, se amplifican considerablemente hasta conectarse con la depresión intermedia, con la sola excepción de los sectores donde la cordillera de la Costa recupera su importancia (Vial y Hernández, 1985).

Característica climática de la zona de estudio

A lo largo de la zona de estudio, de norte a sur, se establece una graduación de climas del tipo mediterráneo determinado por el aumento de la pluviosidad y la gradual disminución de las temperaturas. Además, frente a las costas de la zona central de Chile, específicamente entre los 30 y 40 grados de latitud, se centra la zona subtropical de altas presiones del Pacífico Sur. Dentro de esta zona se encuentra el anticiclón del Pacífico, que es una gran área donde el aire desciende lentamente. En el sector oriental del anticiclón ello provoca condiciones de extrema estabilidad

sobre una capa de aire de hasta 2000 metros de altura. El aire es muy seco, y, en consecuencia, determina un marcado déficit de precipitaciones sobre el sector norte del país. Por otra parte, estas altas presiones, originan los vientos oeste, noroeste y suroeste, según se sitúen los puntos al norte o al sur del anticiclón (Romero, 1985).

Información recopilada

La información necesaria para cumplir los objetivos planteados en la introducción de esta memoria fue obtenida tanto de bibliografía nacional como internacional, para lo cual, se consideraron libros, revistas y sitios en internet acorde a las materias tratadas. Además, se utilizaron diversos software de análisis estadístico y análisis espacial, los cuales proporcionaron las herramientas adecuadas para evaluar toda la información recopilada.

Para crear una base de datos adecuada y confiable, se elaboró un catastro de los parámetros meteorológicos, climáticos y solarimétricos necesarios para realizar posteriormente el análisis y caracterización de la radiación solar global media mensual en la zona central de Chile. Los datos se obtuvieron a partir de 31 estaciones de medición registradas por Arata y Icazategui (1984) y de 19 estaciones de medición registradas por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997), todas ellas distribuidas a lo largo y ancho de la zona de estudio.

La información recopilada consistió en datos de latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar y localidad donde se encuentran emplazadas geográficamente cada una de las estaciones de medición clasificadas. Además, se consideraron valores medios mensuales diarios de temperaturas máximas, temperaturas mínimas, nubosidad, radiación solar global sobre una superficie horizontal, radiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal y coeficiente de transparencia de la atmósfera.

Dentro de la revisión bibliográfica realizada en algunos sitios de internet durante el desarrollo de esta investigación, se aprecia la información digital recopilada originalmente desde reconocidas páginas web de instituciones gubernamentales pertenecientes principalmente a la nación de Estados Unidos de Norte América. Una de ellas corresponde al sitio de internet de la

United States Department of Agriculture, a través de la cual se obtuvo el modelo matemático denominado PINSOL, utilizado en la elaboración del modelo de estimación de la radiación solar global media mensual para la zona central de Chile. También se visitó la página web de la United States Geological Survey, en donde se logró obtener el modelo digital de elevación conocido con el nombre de DEM GTOPO30, necesario para representar geográficamente la distribución espacial de la radiación solar global media mensual estimada para la zona central de Chile.

Software utilizados

En cuanto a los materiales tecnológicos requeridos para solucionar los objetivos señalados en esta investigación, fue necesario utilizar ciertos programas computacionales capaces de desarrollar diversos análisis estadísticos y detallados análisis espaciales, dentro de los cuales se reconoce el software de Microsoft Excel ®, Idrisi Kilimanjaro ®, Statgraphics Plus 5.1 ®, Golden Software Surfer 8 ® y Qbasic ®. Cada uno de estos programas fue instalado en un ordenador cuyas características técnicas generales permitieron realizar un adecuado procesamiento de los datos.

Métodos

En términos generales, la metodología empleada en esta investigación se orientó principalmente en las áreas del análisis estadístico y el análisis espacial, clasificando y evaluando las variables necesaria y relevantes para resolver los objetivos planteados en la introducción de esta memoria. Para una mayor información, a continuación se explica de manera más detallada la metodología utilizada en el desarrollo de esta memoria de acuerdo a cada uno de los objetivos específicos señalados en esta investigación.

Creación de una base de datos para la zona de estudio

Tradicionalmente, los estudios sobre radiación solar han estado condicionados por su dependencia de medidas empíricas que hayan sido tomadas en estaciones de monitoreo situadas sobre el terreno y calculadas a través de fórmulas matemáticas. En este sentido, la creación de una

base de datos para la zona de estudio tuvo como finalidad proporcionar una buena base para el análisis y caracterización de la radiación solar. De esta manera fue posible conocer el comportamiento real a lo largo de la zona central de Chile de ciertas variables meteorológicas, climáticas y solarimétricas que determinan la distribución espacial de la radiación solar sobre la superficie terrestre.

Para obtener una adecuada base de datos, fue necesario recopilar la mayor cantidad de información disponible a través de los registros elaborados para ciertas localidades chilenas ubicadas dentro de la zona de estudio. Sin embargo, con respecto a ciertas variables solarimétricas necesarias tales como la radiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal y el coeficiente de transparencia de la atmósfera, fueron obtenidas a través de la utilización de ciertas fórmulas matemáticas señaladas en la revisión bibliográfica, las cuales se señalan en la secuencia de ecuaciones que se resume a continuación.

$$E_0 = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot d_n}{365}\right) \quad \text{Ec. 81}$$

$$\delta = \text{sen}^{-1}\left[0,4 \cdot \text{sen}\left(\frac{360 \cdot (d_n - 82)}{365}\right)\right] \quad \text{Ec. 82}$$

$$\omega_h = \pm \cos^{-1}(-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad \text{Ec. 83}$$

$$H_{eh} = \frac{24}{\pi} \cdot I_{sc} \cdot E_0 \cdot \left[\begin{array}{l} \text{sen } \delta \cdot \text{sen } \phi \cdot \omega_h \cdot \frac{\pi}{180} + \\ \text{cos } \delta \cdot \text{cos } \phi \cdot \text{sen } \omega_h \end{array} \right] \quad \text{Ec. 84}$$

$$K = \frac{R_g}{R_e} \quad \text{Ec. 85}$$

A través de esta secuencia de ecuaciones empíricas se propuso generar los valores medios mensuales diarios correspondiente a la radiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal y al coeficiente de transparencia de la atmósfera para cada una de las estaciones de medición clasificadas.

Evaluación de variables que modifican la radiación solar

Las relaciones astronómicas y trigonométricas que existen entre el Sol y la superficie terrestre, además de los factores topográficos y atmosféricos característicos de la Tierra, son las principales variables que modifican la radiación solar que ingresa a la Tierra. La influencia de cada una de estas variables se obtiene a través de la utilización de fórmulas matemáticas generalizadas para cualquier ubicación geográfica en la Tierra. En este sentido, la evaluación de ciertas variables que modifican la radiación solar estuvo dirigido al análisis de los principales factores atmosféricos que varían de acuerdo a los fenómenos meteorológicos que ocurren a lo largo de la zona central de Chile, considerando los métodos empíricos más apropiados para estimar la cobertura nubosa de la atmósfera y el coeficiente de transparencia de la atmósfera.

Considerando el grado de dependencia demostrado por diversos investigadores entre la nubosidad y el comportamiento de los grandes centros de acción meteorológicos característicos de la zona central de Chile, se propuso estimar los valores medios mensuales de nubosidad expresada en porcentajes para una serie de estaciones de monitoreo ubicadas en la zona de estudio basado en el cálculo a partir del ciclo anual que presenta el Lugar de Presión Máxima (LPM) en Chile. De modo tal que, la relación lineal entre la nubosidad media mensual y la evolución anual del Lugar de Presión Máxima utilizada en este caso fue del siguiente tipo:

$$C = A + B \cdot (LPM - LAT) \quad \text{Ec. 86}$$

Donde C es la nubosidad media mensual en porcentaje respecto del máximo teórico, las variables A y B corresponden a constantes relacionadas con la regresión lineal, LPM es la latitud correspondiente al Lugar de Presión Máxima en Chile para cada mes y LAT representa la latitud del lugar donde se quiere estimar la cobertura nubosa. En términos prácticos, los coeficientes A y B

corresponden a valores empíricos que permiten un mayor grado de ajuste entre las variables dependientes e independientes, sus respectivos valores pueden variar para las distintas localidades en función de la ubicación geográfica resultando coeficientes específicos para determinadas zonas.

En este sentido, se propuso estimar los coeficientes A y B que aparecen en la ecuación mencionada anteriormente (Ec. 113) a través de un análisis de regresión lineal múltiple utilizando el método Stepwise. En este caso, fue necesario recurrir a los indicadores más representativos de la variación de los respectivos coeficientes A y B, para lo cual se consideraron los valores de latitud y longitud registrados para cada una de las estaciones de medición que conforman la base de datos de la zona de estudio.

La regresión lineal múltiple compuesta por cada uno de estos indicadores representó la relación o dependencia que existe entre los respectivos coeficientes A y B con respecto a los distintos parámetros geográficos disponibles a lo largo y ancho de la zona central de Chile. De esta manera, el procedimiento denominado Stepwise permitió realizar una selección automáticamente de los indicadores que mejor explican el modelo de regresión lineal múltiple a través de un análisis estadístico discriminadorio.

Por otro lado, considerando el desarrollo de diversas expresiones matemáticas por parte de algunos investigadores, las cuales evidencian la influencia que ejercen sobre el coeficiente de transparencia de la atmósfera algunas variables tales como la nubosidad, las temperaturas máximas y mínimas, la heliofanía, la presión y la radiación solar, se propuso estimar los valores medios mensuales del coeficiente de transparencia de la atmósfera para una serie de estaciones de medición ubicadas en la zona central de Chile. En este caso, se evaluó la relación que existe entre la distribución espacial del coeficiente de transparencia de la atmósfera con respecto a ciertas variables meteorológicas y climáticas medidas en cada una de las estaciones de monitoreo contenidas en la base de datos de esta investigación.

Este proceso se realizó a través del programa Statgraphics, el cual permitió determinar las funciones matemáticas que mejor relacionaban las variables involucradas, para luego, analizarlas estadísticamente cada una de ellas. En este sentido, a través de un análisis estadístico se consideró la

relación que mejor explica la dependencia del comportamiento de los valores medios mensuales del coeficiente de transparencia de la atmósfera para la zona central de Chile procesando los datos necesarios correspondientes a las diversas localidades situadas dentro de la zona de estudio.

Estimación de la radiación solar en la zona de estudio

Conocer los valores diarios, mensuales o anuales de la radiación solar global disponible sobre la superficie terrestre de una localidad en particular, es un tema que con el tiempo se ha ido transformando cada vez más en una necesidad para ciertas aplicaciones. Si bien, las estaciones de monitoreo disponibles a lo largo y ancho del territorio chileno, donde se mide esta variable, son escasas, suelen estar vinculadas a los núcleos de población y están situadas preferentemente en los fondos de los valles y a baja altitud, la estimación de la radiación solar a través de ciertos modelos que se basan en la simulación de los procesos físicos que ocurren durante la trayectoria de la energía solar es una de las soluciones que se plantea frente a este dilema.

En este sentido, se propuso diseñar un modelo matemático para estimar la irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal correspondiente a distintas localidades ubicadas en la zona central de Chile, considerando los factores que modifican la radiación solar a lo largo de su recorrido por el espacio, tales como las variables astronómicas, trigonométricas, topográficas y atmosféricas. A través de la utilización de diversas expresiones matemáticas que se mencionan tanto en la revisión bibliográfica como en los resultados y discusión de esta memoria, se logró representar y estimar el grado de influencia de cada una de estas variables sobre la radiación solar global. Cada una de las expresiones matemáticas utilizadas en el modelo de estimación de la irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal fueron evaluadas y calibradas a través de las herramientas de cálculo que contiene el programa Excel.

Para introducir las variables astronómicas, trigonométricas y topográficas en el cálculo de la irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal, se consideró la rutina PINSOL.BAS publicada por la United States Department of Agriculture (2003). Mientras que, el método empleado para incorporar la variable atmosférica en el modelo de estimación de la irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal, se basó en incluir los valores

medios mensuales de la nubosidad de la atmósfera, el coeficiente de transparencia de la atmósfera, el espesor atmosférico, la transmisividad atmosférica, la radiación solar difusa y la radiación solar directa.

Una vez obtenidos los valores correspondientes a la irradiación solar global media mensual estimada sobre una superficie horizontal para una serie de estaciones de monitoreo ubicadas dentro de la zona de estudio, se procedió a validar estos resultados a través de un análisis de regresión utilizando las herramientas que ofrece el programa Statgraphics. Este procedimiento permitió evaluar estadísticamente el comportamiento de los valores medios mensuales de irradiación solar global estimada y medida sobre una superficie horizontal para una serie de estaciones de medición incluidas en la base de datos de esta investigación. En este caso, el grado de explicación del modelo matemático utilizado para estimar la irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal para la zona central de Chile se obtuvo a través del error cuadrado medio.

Representación de la radiación solar en la zona de estudio

Según la metodología planteada anteriormente, hasta el momento solo se ha analizado la irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal sin considerar la gran variedad de altitudes, pendientes y orientaciones que caracterizan la topografía del territorio chileno. Es así como en el último objetivo específico de esta investigación se propuso desarrollar un modelo matemático capaz de representar la distribución espacial de la irradiación solar global media mensual sobre toda la superficie terrestre correspondiente a la zona de estudio.

En este sentido, se consideraron los distintos grados de altura, inclinación y orientación que existen dentro de la zona central de Chile, además de las variables astronómicas, trigonométricas, topográficas y atmosféricas que modifican la radiación solar en su recorrido por el espacio. A través de la utilización de diversas expresiones matemáticas que se mencionan tanto en la revisión bibliográfica como en los resultados y discusión de esta memoria, se logró representar y estimar el grado de influencia de cada una de estas variables sobre la radiación solar global.

Considerando los métodos empíricos más apropiados desarrollados en esta investigación para estimar los valores medios mensuales de la cobertura nubosa de la atmósfera, el coeficiente de transparencia de la atmósfera y la irradiación solar global sobre una superficie horizontal, junto con la rutina PINSOL.BAS publicada por la United States Department of Agriculture (2003), se procedió a diseñar un método computacional de simulación gráfica de la radiación solar global a partir de los atributos de programación que ofrece el programa Qbasic. Para llevar a cabo esta metodología, fue necesario manejar la información contenida en Modelos Digitales de Terreno determinados, en cuyo caso se decidió emplear la pieza W100S10 del DEM GTOPO30 publicada por la United States Geological Survey (2003), considerando exclusivamente la representación digital del territorio continental correspondiente a la zona central de Chile.

A partir de los antecedentes mencionados anteriormente, fue posible representar a través de mapas cartográficos digitales a una escala de 1:1.000.000 la distribución espacial de la irradiación solar global media mensual sobre toda la superficie terrestre característica de la zona central de Chile. Además, utilizando ciertas herramientas computacionales relacionadas con el procesamiento de imágenes digitales, se propuso determinar la distribución espacial media mensual de la nubosidad y el coeficiente de transparencia a lo largo de toda la zona de estudio, obteniéndose mapas cartográficos digitales a una escala de 1:1.000.000 para cada mes del año. En este caso, toda la cartografía manejada durante el desarrollo del último objetivo específico de esta investigación fue procesada mediante un Sistema de Información Geográfico (SIG) considerándose la utilización de los programas Idrisi Kilimanjaro y Surfer.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentarán, analizarán e interpretarán los resultados obtenidos en el desarrollo de esta memoria de acuerdo a los objetivos específicos planteados anteriormente, dando especial énfasis al problema relacionado con la escasa información que se cuenta a nivel nacional de ciertas variables climáticas, meteorológicas y solarimétricas medidas en estaciones de monitoreo a lo largo del territorio chileno, las cuales son indispensables para ciertos estudios dirigidos al análisis de la radiación solar.

Creación de una base de datos para la zona de estudio

Los datos meteorológicos, climáticos y solarimétricos que se recopilaron y formaron parte de la creación de una base de datos para la zona central de Chile fueron seleccionados de acuerdo a los datos disponibles en la literatura nacional para las distintas estación de medición emplazadas dentro de la zona de estudio y que a la vez fueron necesarios para la solución de los objetivos de esta memoria.

La información seleccionada a partir de las estaciones de medición registradas por Arata y Icazategui (1984) se señala en el anexo I. En este caso, se consideraron los registros de 31 estaciones de monitoreo ubicadas en distintas localidades dentro de la zona central de Chile, para cada una de las cuales se recopilaron los valores de nubosidad media mensual. Además de los datos de la latitud, la longitud, la altura sobre el nivel del mar y la localidad donde se encuentran situadas geográficamente cada una de las estaciones de medición clasificadas.

Con respecto a la información seleccionada a partir de las estaciones de medición registradas por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997), esta se señala en el anexo II. En este caso, se consideraron los registros de 19 estaciones de monitoreo ubicadas en distintas localidades dentro de la zona central de Chile, para cada una de las

cuales se recopilaron los valores de nubosidad media mensual diaria, temperaturas medias mensuales diarias máximas, temperaturas medias mensuales diarias mínimas y radiación solar global media mensual diaria sobre una superficie horizontal. Además de los datos de la latitud, la longitud, la altura sobre el nivel del mar y la localidad donde se encuentran situadas geográficamente cada una de las estaciones de medición escogidas.

Cabe señalar que, junto con toda esta información, fue necesario obtener a través de una secuencia de cálculos matemáticos, señalada en los materiales y métodos, los valores medios mensuales diarios de la radiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal y del coeficiente de transparencia de la atmósfera para cada una de las 19 estaciones de medición consideradas a partir del catastro de información meteorológica realizado por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997).

Evaluación de variables que modifican la radiación solar

Considerando la base de datos expuesta anteriormente, se realizó una evaluación de aquellas variables que principalmente modifican la radiación solar que ingresa a la Tierra, para lo cual se propuso desarrollar un modelo de estimación del coeficiente de transparencia y de la nubosidad para la zona central de Chile. A continuación se explican en forma más detallada los resultados obtenidos para la estimación de cada una de estas variables, tomando en cuenta el comportamiento general que describen los respectivos parámetros analizados a lo largo de la zona de estudio durante los distintos meses del año.

Cobertura nubosa de la atmósfera

Utilizando los valores de nubosidad media mensual diaria expresada en porcentajes y la ubicación latitudinal expresada en grados sur para cada una de las 31 estaciones de medición señaladas en el anexo I, junto con los valores correspondientes a la posición latitudinal de la presión media mensual máxima expresada en grados sur, se procedió a desarrollar la regresión lineal (Ec. 86) para cada una de las distintas localidades por separado. Este proceso generó los valores de los

coeficientes A y B para las 31 estaciones de medición evaluadas, los cuales se aprecian en el anexo III junto con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para cada evaluación.

A través de la información señalada en cada uno de los 31 análisis de varianza obtenidos, se puede observar que el coeficiente de determinación varía entre 0,5128 para la localidad de Ovalle y 0,9272 para la localidad de Talca. En tanto, la probabilidad obtenida para cada regresión lineal realizada es menor a 0,01 lo cual refleja la existencia de una relación estadísticamente significativa entre las variables analizadas. Estos valores se consideran bastante aceptables, lo que refuerza la hipótesis original basada en que el Lugar de Presión Máxima es un buen descriptor para estimar los valores de nubosidad en las regiones ubicadas en la zona central de Chile.

Luego, empleando el programa Surfer fue posible evidenciar, a través de una imagen de superficie de la zona central de Chile, la distribución espacial de los respectivos coeficientes A y B obtenidos en las respectivas regresiones lineales realizadas anteriormente, y cuyos valores se señalan en el anexo III. En la figura 26 se puede observar la distribución espacial obtenida para cada uno de los coeficientes por separado.

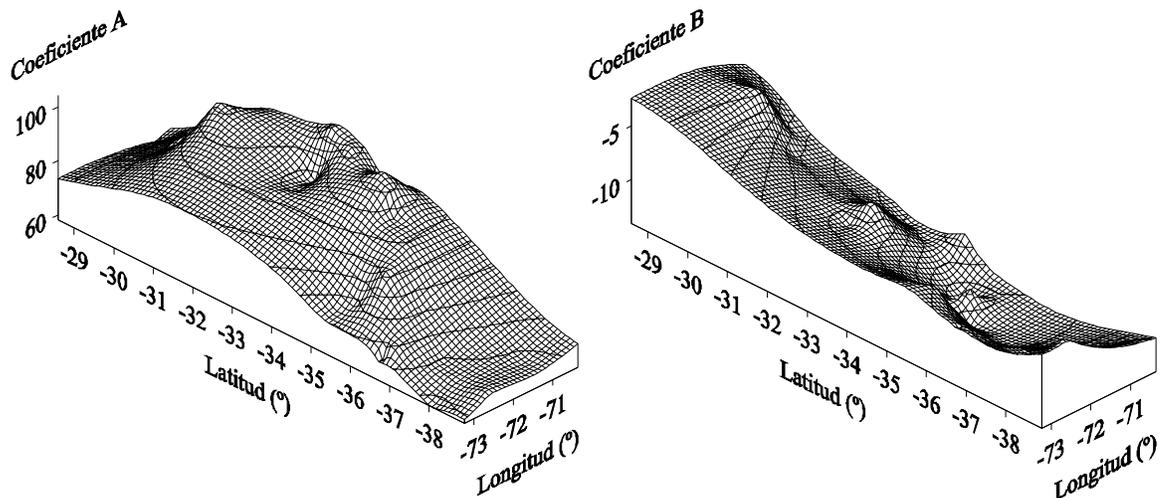


Figura 26: A la izquierda se observa la distribución espacial del coeficiente A y a la derecha se aprecia la distribución espacial del coeficiente B, ambas imágenes obtenidas a partir de los resultados arrojados por la regresión lineal realizada (Ec. 86).

Una vez obtenida toda esta información, se procedió a estimar los coeficientes A y B a través del programa Statgraphics utilizando la siguiente regresión lineal múltiple para cada coeficiente por separado.

$$\text{COEF} = a + b \cdot |\text{LAT}| + c \cdot |\text{LON}| + d \cdot |\text{LAT}|^2 + e \cdot |\text{LON}|^2 + f \cdot |\text{LAT}| \cdot |\text{LON}| \quad \text{Ec. 87}$$

Donde la variable COEF representa a los coeficientes A o B respectivamente, |LAT| es el valor absoluto de la latitud expresada en grados y |LON| corresponde al valor absoluto de la longitud expresada en grados. En este caso, se determinaron los respectivos valores de los índices a, b, c, d, e y f calibrando la regresión lineal múltiple señalada anteriormente (Ec. 87) con los datos de latitud y longitud de las respectivas estaciones de medición registradas en el anexo I, junto con los valores de los coeficientes A y B indicados en los respectivos análisis estadísticos registrados en el anexo III.

Sin embargo, para desarrollar una regresión lineal múltiple que reflejara un grado de dependencia significativo entre los respectivos coeficientes A y B estimados y las variables de latitud y longitud señaladas en la ecuación mencionada anteriormente (Ec. 87), se decidió evaluar cada una de estas variables independientes por separado, para luego seleccionar a las variables más representativas estadísticamente. De este modo, se utilizó el método Stepwise disponible en el programa Statgraphics, a través del cual se realizó un análisis denominado Backward Elimination.

Este procedimiento permitió ir eliminando paulatinamente las variables independientes incluidas en la regresión lineal múltiple (Ec. 87) que no cumplieran con el criterio basado en los valores de la prueba estadística F arrojados a medida que se realizaban los análisis estadísticos necesarios, quedando como resultado una regresión lineal múltiple compuesta por las variables independientes que presentaron un valor de probabilidad (P) menor a 0,01 obteniéndose así una relación estadísticamente significativa entre las variables con un 99% del nivel de confianza.

Los resultados obtenidos del modelo de regresión lineal múltiple más apropiado para describir la relación entre el coeficiente A y las cinco variables independientes se señalan en la siguiente ecuación del modelo inicial ajustado.

$$A = 426,993 - 1,07333 \cdot |\text{LAT}|^2 - 0,300196 \cdot |\text{LON}|^2 + 1,00402 \cdot |\text{LAT}| \cdot |\text{LON}| \quad \text{Ec. 88}$$

Este proceso generó una tabla que se menciona en el cuadro 4, la cual contiene los respectivos análisis estadísticos realizados para evaluar la regresión lineal múltiple desarrollada para estimar los valores del coeficiente A en la zona central de Chile.

Cuadro 4: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal múltiple correspondiente a la estimación del coeficiente A.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,825778				
R cuadrado ajustado	0,80642				
Error standard	6,53928				
Error medio absoluto	4,97294				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	5472,47	3	1824,16	42,66	0,0000
Residuos	1154,58	27	42,7622		
Total	6627,05	30			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
Constante	426,993	58,975	7,24025	0,0000	
$ \text{LAT} ^2$	-1,07333	0,166731	-6,43753	0,0000	
$ \text{LON} ^2$	-0,300196	0,0379243	-7,91566	0,0000	
$ \text{LAT} \cdot \text{LON} $	1,00402	0,157464	6,37619	0,0000	

A través del análisis estadístico realizado para este modelo de regresión lineal múltiple, se observa que el estadístico R^2 indicó que el modelo ajustado explica el 82,5778% de la variabilidad en el coeficiente A. Del mismo modo, el estadístico R^2 ajustado, el cual es considerado el más

apropiado para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, señaló que el modelo ajustado explica el 80,642% de la variabilidad en el coeficiente A.

Además, el error standard de la estimación muestra que la desviación standard de los residuos fue 6,53928 mientras que el error medio absoluto establece que el promedio de los residuos fue 4,97294. En este análisis se observa que el valor de probabilidad (P) más alto en las variables independientes es de 0,0000 y pertenece al producto entre el valor absoluto de la latitud y la longitud ($|LAT| \cdot |LON|$). En este caso, el modelo reflejó un valor de probabilidad (P) inferior a 0,01 lo que evidenció la existencia de una relación estadísticamente significativa entre las variables en un 99% del nivel de confianza.

Por otro lado, los resultados obtenidos del modelo de regresión lineal múltiple más apropiado para describir la relación entre el coeficiente B y las cinco variables independientes se señalan en la siguiente ecuación del modelo ajustado

$$B = -77,3449 + 0,186145 \cdot |LAT|^2 + 0,0615251 \cdot |LON|^2 - 0,190474 \cdot |LAT| \cdot |LON| \quad \text{Ec. 89}$$

A través del análisis estadístico realizado para este modelo de regresión lineal múltiple, se evidenció la existencia de una relación estadísticamente significativa entre las variables en un 99% del nivel de confianza debido a que el valor de probabilidad (P) obtenido para este modelo fue inferior a 0,01. En este caso, el valor de probabilidad (P) más alto en las variables independientes es de 0,0001 y pertenece al valor absoluto de la latitud elevada al cuadrado ($|LAT|^2$).

En este análisis se observa que el estadístico R^2 indicó que el modelo ajustado explica el 76,0625% de la variabilidad en el coeficiente B. El estadístico R^2 ajustado, el cual es considerado el más apropiado para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, señaló que el modelo ajustado explica el 73,4028% de la variabilidad en el coeficiente B. Así mismo, el error standard de la estimación muestra que la desviación standard de los residuos fue 1,54378 mientras que el error medio absoluto establece que el valor promedio de los residuos fue 1,17985.

La tabla que se menciona en el cuadro 5 contiene cada uno de los valores mencionados anteriormente, junto con los respectivos análisis estadísticos realizados para evaluar la regresión lineal múltiple desarrollada para estimar los valores del coeficiente B en la zona central de Chile.

Cuadro 5: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal múltiple correspondiente a la estimación del coeficiente B.

Estadísticas de la regresión	
R cuadrado	0,760625
R cuadrado ajustado	0,734028
Error standard	1,54378
Error medio absoluto	1,17985

Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	204,469	3	68,1562	28,6	0,0000
Residuos	64,3479	27	2,38325		
Total	268,817	30			

Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P
Constante	-77,3449	13,9227	-5,55532	0,0000
LAT ²	0,186145	0,0393614	4,72912	0,0001
LON ²	0,0615251	0,00895309	6,87194	0,0000
LAT * LON	-0,190474	0,0371737	-5,12388	0,0000

Utilizando la ecuación mencionada en los materiales y métodos, la cual relaciona linealmente a la nubosidad media mensual con la evolución anual del Lugar de Presión Máxima en Chile (Ec. 86), junto con los respectivos modelos de regresión lineal múltiple desarrollados (Ec. 88 y Ec. 89), se procedió a estimar los valores medios mensuales de nubosidad para distintas localidades situadas dentro de la zona de estudio. En este caso, fue necesario calibrar cada una de estas fórmulas con la información de latitud y longitud señalada para las 31 estaciones de monitoreo que aparecen en el anexo I. De este modo, en el cuadro 6 se mencionan los valores estimados de nubosidad media mensual en octavos para cada una de las estaciones de monitoreo consideradas, junto con los valores estimados del coeficiente A y del coeficiente B.

Cuadro 6: Valores de nubosidad media mensual diaria estimada a través de la secuencia de ecuaciones matemáticas propuesta anteriormente (Ec. 86, Ec. 88 y Ec. 89) para 31 estaciones de monitoreo registradas en el anexo I correspondiente a diversas localidades ubicadas en la zona central de Chile.

Localidad estación de monitoreo	Coeficiente		Nubosidad (octavos)											
	A	B	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Vallenar	77,5957	-2,4310	4,0	3,9	3,9	4,2	4,6	4,5	4,6	4,4	4,3	4,1	4,0	4,0
La Serena	82,4006	-4,3744	3,1	2,8	3,0	3,4	4,1	4,0	4,1	3,9	3,5	3,3	3,2	3,0
Coquimbo	81,0323	-4,0562	3,2	3,0	3,1	3,5	4,2	4,1	4,2	4,0	3,7	3,4	3,3	3,2
Vicuña	89,8039	-6,2542	2,2	1,9	2,0	2,7	3,7	3,5	3,7	3,3	2,9	2,5	2,3	2,1
Ovalle	87,6226	-6,1379	2,4	2,1	2,2	2,9	3,9	3,7	3,9	3,5	3,1	2,7	2,5	2,3
Quillota	87,1181	-8,0406	2,5	2,0	2,2	3,0	4,3	4,1	4,4	3,9	3,3	2,8	2,6	2,3
Llay-Llay	97,3243	-10,595	1,8	1,2	1,5	2,6	4,3	4,0	4,3	3,7	2,9	2,2	2,0	1,6
Los Andes	100,823	-11,497	1,6	0,9	1,2	2,4	4,2	4,0	4,3	3,6	2,8	2,0	1,8	1,4
Valparaíso	91,1512	-9,2112	2,2	1,7	1,9	2,9	4,4	4,1	4,4	3,8	3,2	2,6	2,4	2,1
Santiago	99,9366	-11,989	1,8	1,1	1,4	2,7	4,6	4,3	4,7	3,9	3,1	2,3	2,0	1,6
Rancagua	98,3886	-12,510	2,1	1,4	1,7	3,0	5,0	4,7	5,1	4,3	3,4	2,6	2,3	1,9
El Teniente	101,653	-13,297	2,0	1,2	1,5	2,9	5,0	4,7	5,2	4,3	3,3	2,5	2,2	1,7
San Fernando	95,2823	-12,259	2,4	1,7	2,0	3,3	5,3	5,0	5,4	4,6	3,7	2,9	2,6	2,2
Curicó	92,3489	-12,028	2,6	2,0	2,3	3,5	5,4	5,1	5,5	4,8	3,9	3,1	2,8	2,4

(continúa)

Cuadro 6: (Continuación).

Localidad estación de monitoreo	Coeficiente		Nubosidad (octavos)											
	A	B	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Molina	91,5417	-11,985	2,7	2,0	2,3	3,6	5,5	5,2	5,6	4,8	4,0	3,2	2,9	2,5
Talca	87,1617	-11,324	2,9	2,3	2,6	3,7	5,6	5,3	5,6	4,9	4,1	3,4	3,1	2,7
Constitución	77,5134	-8,5318	3,1	2,6	2,8	3,7	5,1	4,9	5,1	4,6	4,0	3,4	3,2	2,9
Punta Carranza	79,1245	-9,3678	3,1	2,6	2,8	3,8	5,3	5,1	5,4	4,8	4,1	3,5	3,3	3,0
Linares	85,7311	-11,615	3,1	2,4	2,7	3,9	5,8	5,5	5,9	5,1	4,3	3,6	3,3	2,9
Cauquenes	79,6002	-10,115	3,2	2,6	2,9	3,9	5,5	5,3	5,6	5,0	4,3	3,6	3,4	3,0
Chillán	78,5641	-10,921	3,4	2,8	3,1	4,2	5,9	5,7	6,0	5,3	4,5	3,8	3,6	3,2
Punta Tumbes	71,2015	-8,8368	3,4	2,9	3,1	4,0	5,4	5,2	5,5	4,9	4,3	3,7	3,5	3,2
Talcahuano	70,5527	-8,8308	3,4	2,9	3,1	4,0	5,4	5,2	5,5	4,9	4,3	3,7	3,5	3,3
Concepción	70,4815	-9,0230	3,4	2,9	3,1	4,1	5,5	5,3	5,6	5,0	4,4	3,8	3,6	3,3
Los Ángeles	70,5325	-10,310	3,6	3,1	3,3	4,4	6,0	5,8	6,1	5,5	4,7	4,0	3,8	3,5
Angol	66,0075	-9,7126	3,7	3,1	3,4	4,4	5,9	5,7	6,0	5,4	4,7	4,1	3,8	3,5
Contulmo	61,0938	-8,7007	3,6	3,1	3,3	4,2	5,6	5,4	5,7	5,1	4,5	3,9	3,7	3,4
Traiguén	62,1494	-9,5457	3,7	3,2	3,4	4,4	5,9	5,7	6,0	5,4	4,7	4,1	3,9	3,6
Lonquimay	66,9741	-11,640	4,0	3,3	3,6	4,8	6,7	6,4	6,8	6,0	5,2	4,5	4,2	3,8
Temuco	57,6971	-9,4294	3,7	3,2	3,4	4,4	5,9	5,7	6,0	5,4	4,7	4,1	3,9	3,6
Puerto Domínguez	53,0606	-8,3197	3,6	3,1	3,3	4,2	5,5	5,3	5,6	5,0	4,4	3,9	3,7	3,4

Considerando esta información, a través del programa Golden Software Surfer fue posible representar, a lo largo y ancho de la zona central de Chile, la distribución espacial de cada uno de los coeficientes A y B obtenidos a partir de los respectivos modelos de regresión lineal múltiple desarrollados, cuyos valores aparecen en el cuadro 6. En la figura 27 es posible observar la representación gráfica de cada uno de estos coeficientes para las distintas latitudes y longitudes que existen dentro de la zona de estudio.

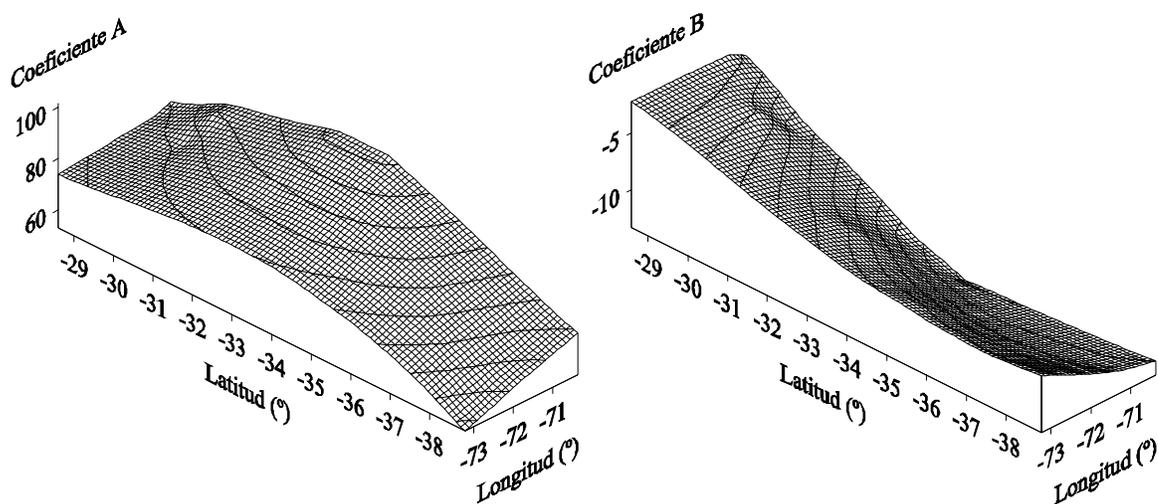


Figura 27: A la izquierda se observa la distribución espacial del coeficiente A y a la derecha se aprecia la distribución espacial del coeficiente B, ambas imágenes obtenidas a partir de los resultados arrojados por los respectivos modelos de regresión lineal múltiple desarrollados (Ec. 88 y Ec. 89).

Al comparar las representaciones gráficas señaladas en la figura 26 con respecto a las representaciones gráficas mostradas en la figura 27, se observó que en general, la distribución espacial del coeficiente A obtenido a través de las regresiones lineales realizadas (Ec. 86) mantiene un perfil gráfico similar a la distribución espacial del coeficiente A obtenido a partir del modelo de regresión lineal múltiple desarrollado (Ec. 88). La misma situación ocurre al comparar las respectivas distribuciones espaciales correspondientes al coeficiente B. Si bien, es posible encontrar ciertas excepciones entre las respectivas distribuciones espaciales tanto para el coeficiente A como para el coeficiente B, estas se consideran como casos aislados.

Considerando los atributos del programa Statgraphics, se realizó un análisis de regresión lineal para poder evaluar estadísticamente los valores de nubosidad media mensual estimados en octavos para 31 estaciones de monitoreo con respecto a la información de nubosidad media mensual medida en octavos para cada una de las estaciones mencionadas. En la figura 28 es posible apreciar la relación gráfica obtenida entre estas dos variables, donde la nubosidad media mensual estimada corresponde a la variable independiente, mientras que, la variable dependiente esta representada por la nubosidad media mensual medida.

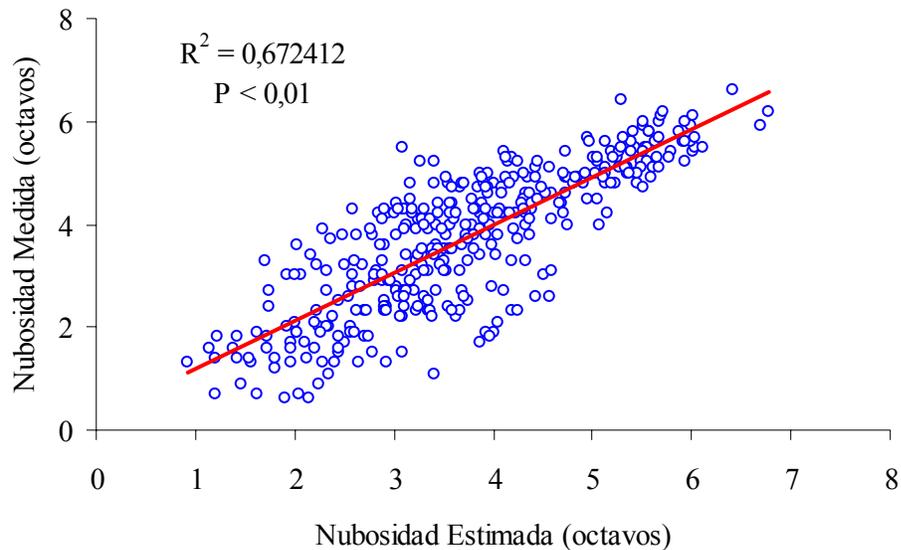


Figura 28: Gráfico de regresión lineal desarrollado entre la información de nubosidad media mensual medida en octavos que aparecen en el anexo I y los valores de nubosidad media mensual estimada en octavos que se señalan en el cuadro 6, para diversas localidades ubicadas dentro de la zona central de Chile.

Para mayor información acerca de este análisis, en el cuadro 7 es posible apreciar, con un mayor detalle, los resultados obtenidos en este procedimiento a través de una tabla de datos que contiene los respectivos análisis estadísticos de la regresión lineal desarrollada entre la nubosidad media mensual medida y la nubosidad media mensual estimada para la zona central de Chile.

Cuadro 7: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal entre la información de nubosidad media mensual medida en octavos y los valores de nubosidad media mensual estimada en octavos, para 31 estaciones de monitoreo localizadas dentro de la zona central de Chile.

Estadísticas de la regresión	
R cuadrado	0,672412
R cuadrado ajustado	0,671526
Error standard	0,780012
Error medio absoluto	0,601421

Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	462,074	1	462,074	759,47	0,0000
Residuos	225,115	370	0,608419		
Total	687,189	371			

Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P
Intercepto	0,243407	0,132752	1,83354	0,0675
Pendiente	0,933792	0,0338841	27,5584	0,0000

Al realizar un análisis de regresión lineal considerando en conjunto las 31 estaciones de monitoreo en las cuales se midieron y estimaron los valores de nubosidad media mensual en octavos para la zona central de Chile, se observó una relación estadísticamente significativa entre ambas variables en un 99% del nivel de confianza, con un valor de probabilidad (P) menor a 0,01. Este procedimiento evidenció que el estadístico R^2 explica el 67,2412% de la variabilidad en los valores de nubosidad media mensual medida en octavos.

En este caso, el error standard de la estimación muestra que la desviación standard de los residuos fue 0,780012 y el error medio absoluto establece que el valor promedio de los residuos fue 0,601421. Sin embargo, el promedio del error cuadrado medio obtenido en la relación entre la nubosidad media mensual estimada y la nubosidad media mensual medida correspondió a 0,608419 octavos aproximadamente.

Coefficiente de transparencia de la atmósfera

A partir de la base de datos registrada en el anexo II para distintas localidades ubicadas en la zona central de Chile, se procedió a evaluar el comportamiento del coeficiente de transparencia medio mensual a lo largo de la zona de estudio. En este caso, se desarrolló un modelo de estimación del coeficiente de transparencia para la zona central de Chile evaluando por separado la correlación de esta variable dependiente con respecto a la amplitud térmica media mensual en grados Celsius y a la nubosidad media mensual en octavos, considerando finalmente la relación estadísticamente mejor establecida.

A través del programa Statgraphics se ajustaron los datos medios mensuales del coeficiente de transparencia, perteneciente a 19 estaciones de monitoreo ubicadas en distintas localidades dentro de la zona de estudio, con los valores medios mensuales de la temperatura máxima en grados Celsius y de la temperatura mínima en grados Celsius registradas por cada una de las estaciones mencionadas anteriormente. Algunas de las correlaciones encontradas que gráficamente mejor reflejaron la dependencia del coeficiente de transparencia con respecto a la amplitud térmica para la zona central de Chile se representan a través de las siguientes ecuaciones (Ec. 90 y Ec. 91).

$$K = A \cdot \left[1 - e^{-B \cdot (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})} \right] \quad \text{Ec. 90}$$

$$K = A \cdot \sqrt{(T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})} \quad \text{Ec. 91}$$

Donde K representa al coeficiente de transparencia medio mensual, $T_{\text{máx}}$ es la temperatura media mensual máxima y $T_{\text{mín}}$ corresponde a la temperatura media mensual mínima. En este caso, tanto la variable A como la variable B representan coeficientes de ajuste para cada una de las respectivas ecuaciones en relación a la información procesada.

Para obtener un análisis estadístico confiable que reflejara la relación entre la amplitud térmica y el coeficiente de transparencia estimado a través de la primera fórmula matemática (Ec. 90) se realizó un análisis de regresión no lineal para este tipo de ecuación, utilizando los mismos

datos que la originaron y procesando esta información a través del programa Statgraphics. Este procedimiento generó una tabla que se menciona en el cuadro 8, la cual contiene los análisis estadísticos desarrollados para evaluar esta relación que estima los valores medios mensuales del coeficiente de transparencia en la zona central de Chile a partir de la amplitud térmica.

Cuadro 8: Tabla con los análisis estadísticos de la regresión no lineal realizada a la primera correlación (Ec. 90), la cual estima el coeficiente de transparencia a partir de la amplitud térmica.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado	0,519473			
R cuadrado ajustado	0,517347			
Error standard	0,0612504			
Error medio absoluto	0,0497033			

Análisis de varianza			
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados
Regresión	61,5012	2	30,7506
Residuos	0,847864	226	0,00375161
Total	62,3491	228	

Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,689863	0,0238575	0,642851	0,736875
B	0,11741	0,00925375	0,0991754	0,135645

A través de este análisis fue posible apreciar que los coeficientes A y B son variables estadísticamente significativas en un 95% del nivel de confianza, debido a que dentro de los respectivos intervalos de confianza obtenidos no se encuentra el valor cero (0). Por lo tanto, se evidenció que existe una relación entre las variables analizadas, la cual refleja un valor de probabilidad (P) menor a 0,05.

En este caso, el estadístico R^2 indicó que el modelo ajustado explica el 51,9473% de la variabilidad en el coeficiente de transparencia K. En cambio, el estadístico R^2 ajustado, el cual es considerado el más apropiado para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, señaló que el modelo ajustado explica el 51,7347% de la variabilidad en el

coeficiente de transparencia K . Igualmente, el error standard de la estimación muestra que la desviación standard de los residuos fue 0,0612504 y el error medio absoluto establece que el valor promedio de los residuos fue 0,0497033.

A través de la figura 29 se puede observar la representación gráfica correspondiente a la primera correlación (Ec. 90) obtenida entre el coeficiente de transparencia medio mensual y la amplitud térmica para 19 estaciones de monitoreo ubicadas en la zona central de Chile.

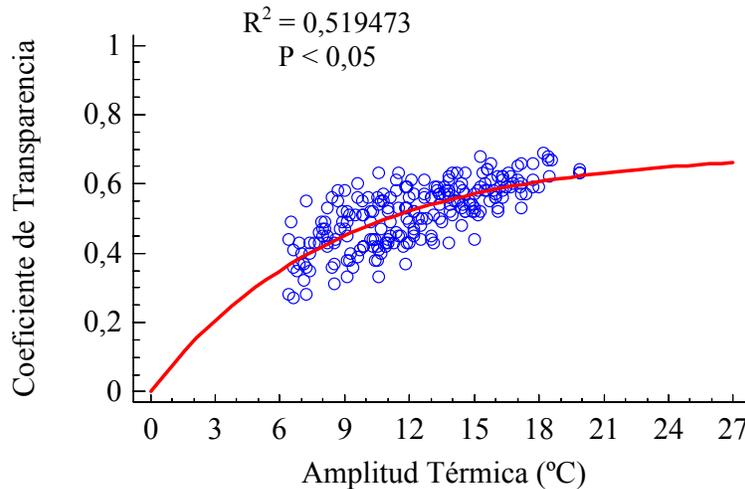


Figura 29: Regresión no lineal entre el coeficiente de transparencia medio mensual y la amplitud térmica (Ec. 90) en la zona central de Chile obtenida para las 19 estaciones de monitoreo registradas en el anexo II.

Sin embargo, para evaluar estadísticamente la relación entre la amplitud térmica y el coeficiente de transparencia obtenido a través de la segunda fórmula matemática (Ec. 91) se realizó un procedimiento distinto. En este caso, se decidió generar un modelo matemático capaz de estimar la variable de ajuste A para las distintas localidades ubicadas dentro de la zona central de Chile. De esta manera, considerando la segunda correlación (Ec. 91) junto con los datos de las estaciones de monitoreo que dieron origen a esta ecuación, se realizaron individualmente análisis de regresión no lineal para cada una de estas estaciones, procesando toda esta información a través del programa

Statgraphics. Este procedimiento generó 19 tablas de evaluación, las cuales se señalan en el anexo IV y contienen los respectivos análisis estadísticos obtenidos para cada estación de monitoreo por separado, además de los valores correspondientes al coeficiente de ajuste A para cada una de las localidades evaluadas.

Una vez obtenida esta información, se procedió a desarrollar el modelo matemático necesario para estimar la variable A que ajusta la ecuación mencionada anteriormente (Ec. 91), evaluando la relación que existe entre esta variable y la latitud, longitud y altitud característica de la zona central de Chile a través de la utilización del siguiente modelo matemático (Ec. 92).

$$A = a + b \cdot |LAT| + c \cdot |LON| + d \cdot ALT + e \cdot |LAT|^2 + f \cdot |LON|^2 + g \cdot ALT^2 + h \cdot |LAT| \cdot |LON| + i \cdot |LAT| \cdot ALT + j \cdot |LON| \cdot ALT \quad \text{Ec. 92}$$

Donde la variable A representa al coeficiente de ajuste evaluado, |LAT| es el valor absoluto de la latitud expresada en grados, |LON| corresponde al valor absoluto de la longitud expresada en grados y ALT es la altitud expresada en metros. En este caso, se determinaron los respectivos valores de los índices a, b, c, d, e, f, g, h, i y j calibrando el modelo matemático señalado anteriormente (Ec. 92) con los datos de latitud, longitud y altitud de las respectivas estaciones de medición registradas en el anexo II, junto con los valores del coeficiente A indicado en los respectivos análisis estadísticos registrados en el anexo IV.

Para mejorar el grado de dependencia significativo entre el coeficiente de ajuste A estimado y las variables de latitud, longitud y altitud señaladas a través de este modelo matemático (Ec. 92), se decidió evaluar cada una de estas variables independientes por separado, para luego seleccionar a las variables más representativas estadísticamente. De este modo, se utilizó el método Stepwise disponible en el programa Statgraphics, a través del cual se realizó un análisis denominado Backward Elimination.

Este procedimiento permitió ir eliminando paulatinamente las variables independientes incluidas en este modelo matemático (Ec. 92) que no cumplieran con el criterio basado en los valores de la prueba estadística F arrojados a medida que se realizaban los análisis estadísticos

necesarios, quedando como resultado una regresión lineal múltiple compuesta por las variables independientes que se señalan en la siguiente ecuación del modelo inicial ajustado.

$$A = -15,941 + 0,4563 \cdot |LAT| + 0,223552 \cdot |LON| + 0,0028423 \cdot ALT - 0,00633431 \cdot |LAT| \cdot |LON| - 0,0000402832 \cdot |LON| \cdot ALT \quad \text{Ec. 93}$$

Además, se generó una tabla que se menciona en el cuadro 9, la cual contiene los respectivos análisis estadísticos realizados para evaluar la regresión lineal múltiple desarrollada para estimar los valores del coeficiente A en la zona central de Chile.

Cuadro 9: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal múltiple correspondiente a la estimación del coeficiente de ajuste A.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,59182				
R cuadrado ajustado	0,434828				
Error standard	0,0117408				
Error medio absoluto	0,00783865				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	0,00259825	5	0,000519649	3,77	0,0249
Residuos	0,00179202	13	0,000137847		
Total	0,00439026	18			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
Constante	-15,941	7,46074	-2,13665	0,0522	
LAT	0,4563	0,220046	2,07366	0,0585	
LON	0,223552	0,102904	2,17243	0,0489	
ALT	0,0028423	0,00136716	2,07899	0,0580	
LAT * LON	-0,00633431	0,00303069	-2,09006	0,0568	
LON *ALT	-0,0000402832	0,0000195176	-2,06393	0,0596	

A través del análisis estadístico realizado para esta regresión lineal múltiple, se observa que el estadístico R^2 indicó que el modelo ajustado explica el 59,182% de la variabilidad en el coeficiente de ajuste A. Del mismo modo, el estadístico R^2 ajustado, el cual es considerado el más

apropiado para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, señaló que el modelo ajustado explica el 43,4828% de la variabilidad en el coeficiente de ajuste A.

Además, el error standard de la estimación muestra que la desviación standard de los residuos fue 0,0117408 mientras que el error medio absoluto determina que el valor promedio de los residuos fue 0,00783865. En este análisis se observa que el valor de probabilidad (P) más alto en las variables independientes es de 0,0596 y pertenece al producto entre la altitud y el valor absoluto de la longitud ($|LON|*ALT$). En este caso, el modelo reflejó un valor de probabilidad (P) inferior a 0,05 lo que evidenció la existencia de una relación estadísticamente significativa entre las variables en un 95% del nivel de confianza.

En la figura 30 es posible apreciar la representación gráfica correspondiente a la segunda correlación (Ec. 91) obtenida entre el coeficiente de transparencia medio mensual y la amplitud térmica para 19 estaciones de monitoreo ubicadas en la zona central de Chile.

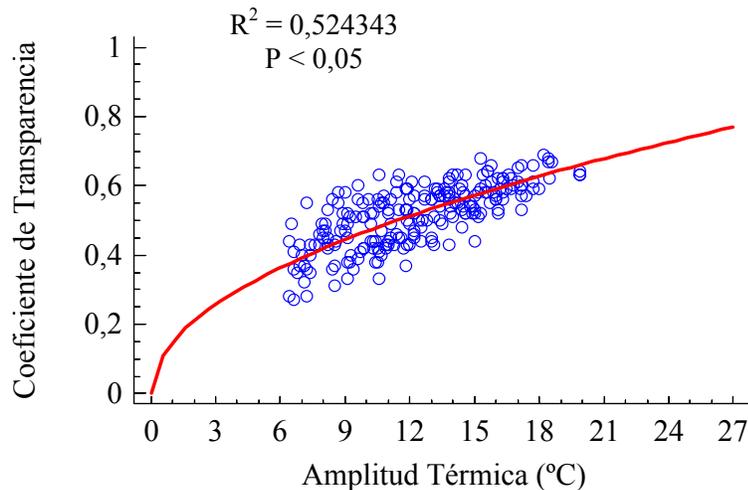


Figura 30: Regresión no lineal entre el coeficiente de transparencia medio mensual y la amplitud térmica (Ec. 91) en la zona central de Chile obtenida para las 19 estaciones de monitoreo registradas en el anexo II.

Si bien, el nivel de significancia conseguido a través de las relaciones entre el coeficiente de transparencia y la amplitud térmica (Ec. 90 y Ec. 91) es aceptable y explican razonablemente la dependencia que existe entre ambas variables, se obtuvieron resultados aún mejores mediante la correlación de los valores del coeficiente de transparencia medio mensual con respecto a la nubosidad media mensual.

Del mismo modo como se realizó el análisis mencionado anteriormente, utilizando el programa Statgraphics se ajustaron los datos medios mensuales del coeficiente de transparencia, perteneciente a 11 estaciones de monitoreo ubicadas en distintas localidades dentro de la zona de estudio, con los valores medios mensuales de la nubosidad registradas en octavos por cada una de las estaciones antedichas. Algunas de las correlaciones encontradas que gráficamente mejor reflejaron la dependencia del coeficiente de transparencia con respecto a la cobertura nubosa para la zona central de Chile se representan a través de las siguientes ecuaciones (Ec. 94 y Ec. 95).

$$K = \frac{1}{A + B \cdot C^D} \quad \text{Ec. 94}$$

$$K = A - B \cdot C^2 \quad \text{Ec. 95}$$

Donde K representa al coeficiente de transparencia medio mensual y C es la nubosidad media mensual en octavos. En este caso, las variables A, B y D corresponden a coeficientes de ajuste para cada una de las respectivas ecuaciones en relación a la información procesada.

Luego, a través del programa Statgraphics se decidió realizar un análisis de regresión no lineal a cada una de estas fórmulas matemáticas (Ec. 94 y Ec. 95) por separado, procesando los mismos datos que las originaron. De esta manera, fue posible obtener un análisis estadístico confiable que reflejara la relación entre la cobertura nubosa y el coeficiente de transparencia estimado a través de estas dos expresiones matemáticas.

Los resultados obtenidos de la regresión no lineal desarrollada para la primera correlación (Ec. 94) se representaron a través de una tabla que se menciona en el cuadro 10, la cual contiene los

análisis estadísticos necesarios para evaluar esta relación que estima los valores medios mensuales del coeficiente de transparencia en la zona central de Chile a partir de la cobertura nubosa.

Cuadro 10: Tabla generada por el análisis de regresión no lineal desarrollado para la primera correlación (Ec. 94) correspondiente a la estimación del coeficiente de transparencia a partir de la cobertura nubosa.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado		0,684775		
R cuadrado ajustado		0,679888		
Error standard		0,0466446		
Error medio absoluto		0,0365861		
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	37,3606	3	12,4535	
Residuos	0,280668	129	0,00217572	
Total	37,6413	132		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	1,61212	0,0293094	1,55413	1,67011
B	0,00777257	0,00467381	-0,0014747	0,0170198
D	2,70424	0,341356	2,02886	3,37962

A través del análisis de regresión no lineal realizado para la primera correlación (Ec. 94), se observa que el estadístico R^2 indicó que el modelo ajustado explica el 68,4775% de la variabilidad en el coeficiente de transparencia K. Del mismo modo, el estadístico R^2 ajustado, el cual es considerado el más apropiado para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, señaló que el modelo ajustado explica el 67,9888% de la variabilidad en el coeficiente de transparencia K.

Así mismo, el error standard de la estimación muestra que la desviación standard de los residuos fue 0,0466446 y el error medio absoluto determina que el valor promedio de los residuos fue 0,0365861. En este análisis se evidenció la existencia de una relación estadísticamente significativa para las variables A y D en un 95% del nivel de confianza, reflejando un valor de

probabilidad (P) menor a 0,05 debido a que dentro de los respectivos intervalos de confianza obtenidos no se encuentra el valor cero (0). Sin embargo, no ocurrió lo mismo para la variable B, la cual contiene dentro de su intervalo de confianza el valor crítico cero (0), con lo cual no es posible concluir que esta variable sea estadísticamente significativa en un 95% del nivel de confianza.

A través de la figura 31 se puede observar la representación gráfica correspondiente a la primera correlación (Ec. 94) obtenida entre el coeficiente de transparencia medio mensual y la cobertura nubosa para 11 estaciones de monitoreo ubicadas en la zona central de Chile.

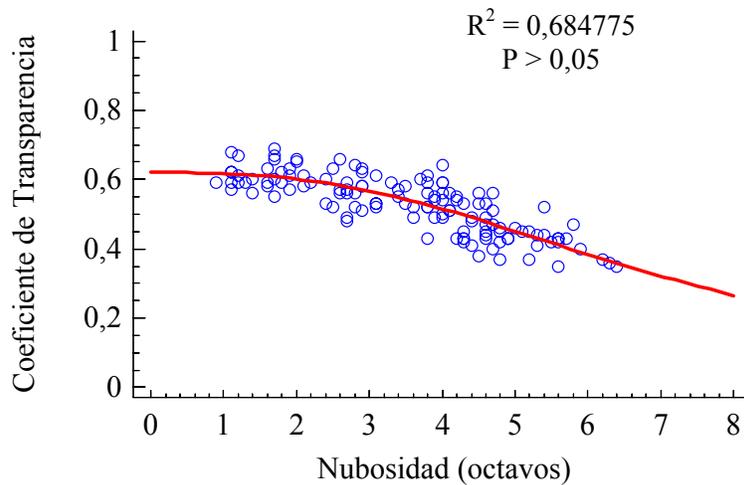


Figura 31: Regresión no lineal entre el coeficiente de transparencia medio mensual y la cobertura nubosa (Ec. 94) en la zona central de Chile obtenida para las 11 estaciones de monitoreo registradas en el anexo II.

Por otro lado, los resultados obtenidos de la regresión no lineal desarrollada para la segunda correlación (Ec. 95) se representaron a través de una tabla que se menciona en el cuadro 11, la cual contiene los análisis estadísticos necesarios para evaluar esta relación que estima los valores medios mensuales del coeficiente de transparencia en la zona central de Chile a partir de la cobertura nubosa.

Cuadro 11: Tabla generada por el análisis de regresión no lineal desarrollado para la segunda correlación (Ec. 95) correspondiente a la estimación del coeficiente de transparencia a partir de la cobertura nubosa.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado			0,681719	
R cuadrado ajustado			0,679271	
Error standard			0,0466895	
Error medio absoluto			0,0368752	
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	37,3579	2	18,679	
Residuos	0,283388	130	0,00217991	
Total	37,6413	132		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,626641	0,00719071	0,612415	0,640867
B	0,00689277	0,000413071	0,00607556	0,00770999

A través de este análisis fue posible apreciar que los coeficientes A y B son variables estadísticamente significativas en un 95% del nivel de confianza, debido a que dentro de los respectivos intervalos de confianza obtenidos no se encuentra el valor cero (0). Por lo tanto, se evidenció que existe una relación entre las variables analizadas, la cual refleja un valor de probabilidad (P) menor a 0,05.

En este caso, el estadístico R^2 indicó que el modelo ajustado explica el 68,1719% de la variabilidad en el coeficiente de transparencia K. Del mismo modo, el estadístico R^2 ajustado, el cual es considerado el más apropiado para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, señaló que el modelo ajustado explica el 67,9271% de la variabilidad en el coeficiente de transparencia K. Igualmente, el error standard de la estimación muestra que la desviación standard de los residuos fue 0,0466895 y el error medio absoluto establece que el valor promedio de los residuos fue 0,0368752.

A través de la figura 32 se puede observar la representación gráfica correspondiente a la segunda correlación (Ec. 95) obtenida entre el coeficiente de transparencia medio mensual y la cobertura nubosa para 11 estaciones de monitoreo ubicadas en la zona central de Chile.

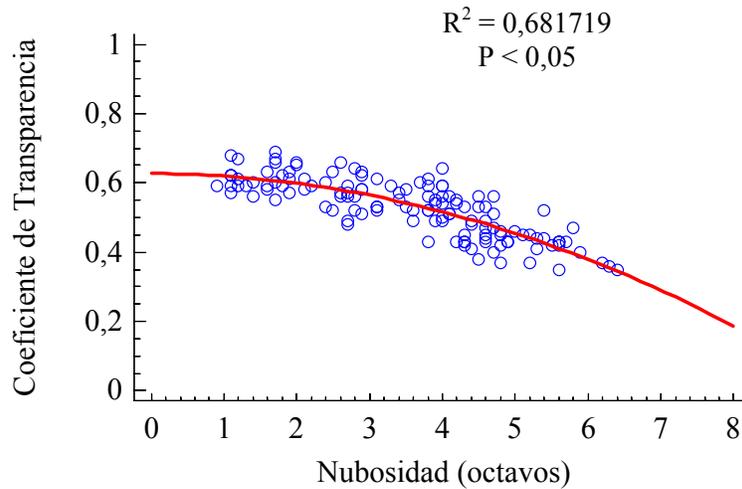


Figura 32: Regresión no lineal entre el coeficiente de transparencia medio mensual y la cobertura nubosa (Ec. 95) en la zona central de Chile obtenida para las 11 estaciones de monitoreo registradas en el anexo II.

No hay duda que el análisis de regresión realizado para evaluar la segunda correlación entre el coeficiente de transparencia y la nubosidad (Ec. 95) arrojó los mejores resultados estadísticos que se podían esperar. En cuyo caso, se explicó un mayor porcentaje de la variabilidad del coeficiente de transparencia a través del estadístico R^2 más alto obtenido. Además, reflejó un grado de relación entre las variables analizadas dentro de lo estadísticamente aceptable, obteniéndose una correlación compuesta de variables netamente significativas. Considerando estos antecedentes, se decidió estimar los valores medios mensuales del coeficiente de transparencia calibrando esta ecuación (Ec. 95) con los datos de nubosidad media mensual en octavos de 11 estaciones de monitoreo ubicadas en la zona central de Chile, cuyos resultados se señalan en el cuadro 12.

Cuadro 12: Valores del coeficiente de transparencia medio mensual estimado a través de la segunda correlación desarrollada (Ec. 95) para 11 estaciones de monitoreo registradas en el anexo II correspondientes a diversas localidades ubicadas dentro de la zona central de Chile.

Localidad estación de monitoreo	Coeficiente de transparencia											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Faro Punta Ángeles Valparaíso	0,57	0,58	0,52	0,50	0,47	0,41	0,44	0,53	0,47	0,48	0,53	0,54
Aeropuerto Arturo Merino Benítez Ex Pudahuel	0,62	0,62	0,61	0,59	0,50	0,48	0,47	0,51	0,51	0,52	0,58	0,61
Quinta Normal	0,61	0,61	0,60	0,58	0,51	0,49	0,47	0,50	0,52	0,52	0,57	0,60
Base Aérea El Bosque	0,62	0,62	0,61	0,58	0,52	0,47	0,49	0,51	0,52	0,52	0,57	0,60
La Platina INIA	0,62	0,62	0,61	0,57	0,50	0,46	0,47	0,49	0,52	0,55	0,58	0,61
Guayacán San José De Maipo	0,62	0,62	0,60	0,57	0,53	0,43	0,52	0,56	0,55	0,55	0,59	0,60
Antena Radio Quelentaro	0,61	0,60	0,58	0,56	0,47	0,43	0,46	0,49	0,51	0,56	0,57	0,60
Cauquenes INIA	0,62	0,62	0,61	0,58	0,49	0,48	0,48	0,54	0,56	0,58	0,59	0,61
Santa Rosa De Cato	0,61	0,60	0,57	0,53	0,43	0,46	0,41	0,48	0,51	0,54	0,57	0,60
Universidad De Concepción Bellavista	0,58	0,58	0,53	0,50	0,40	0,41	0,41	0,39	0,47	0,48	0,49	0,53
Victoria FACH	0,53	0,54	0,52	0,45	0,39	0,35	0,34	0,36	0,43	0,42	0,44	0,45

Una vez obtenida esta información, se realizó un análisis de regresión lineal a través del programa Statgraphics para poder evaluar estadísticamente los valores del coeficiente de transparencia medio mensual estimado para 11 estaciones de monitoreo con respecto a la información del coeficiente de transparencia medio mensual medido para cada una de las estaciones antedichas. A través de la figura 33 se puede apreciar la relación gráfica obtenida entre estas dos variables, donde el coeficiente de transparencia medio mensual estimado corresponde a la variable independiente, mientras que, la variable dependiente esta representada por el coeficiente de transparencia medio mensual medido.

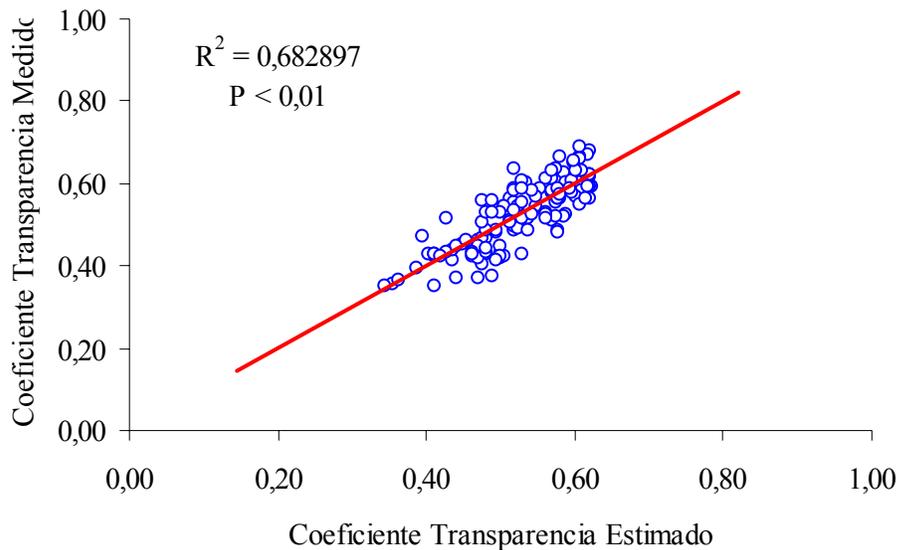


Figura 33: Regresión lineal entre los datos del coeficiente de transparencia medio mensual medido por ciertas estaciones de monitoreo que se mencionan en el anexo II y los valores del coeficiente de transparencia medio mensual estimado que se señalan en el cuadro 12 para diversas localidades ubicadas dentro de la zona central de Chile.

Para mayor información acerca de este análisis, en el cuadro 13 se aprecia, con un mayor nivel de detalle, los resultados obtenidos en este procedimiento a través de una tabla de datos que contiene los respectivos análisis estadísticos de la regresión lineal desarrollada entre el coeficiente

de transparencia medio mensual medido y el coeficiente de transparencia medio mensual estimado para la zona central de Chile.

Cuadro 13: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal entre los datos del coeficiente de transparencia medio mensual medido y los valores del coeficiente de transparencia medio mensual estimado, para 11 estaciones de monitoreo localizadas dentro de la zona central de Chile.

Estadísticas de la regresión	
R cuadrado	0,682897
R cuadrado ajustado	0,680458
Error standard	0,046603
Error medio absoluto	0,0366331

Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	0,608032	1	0,608032	279,96	0,0000
Residuos	0,28234	130	0,00217184		
Total	0,890372	131			

Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P
Intercepto	0,00340863	0,0315931	0,107891	0,9142
Pendiente	0,992685	0,0593284	16,732	0,0000

Al realizar un análisis de regresión lineal considerando en conjunto las 11 estaciones de monitoreo en las cuales se midieron y estimaron los valores del coeficiente de transparencia medio mensual para la zona central de Chile, se observó una relación estadísticamente significativa entre ambas variables en un 99% del nivel de confianza, con un valor de probabilidad (P) menor a 0,01. Este procedimiento evidenció que el estadístico R^2 explica el 68,2897% de la variabilidad en los valores de nubosidad media mensual medida en octavos.

En este caso, el error standard de la estimación establece que la desviación standard de los residuos fue 0,046603. Del mismo modo, el error medio absoluto especifica que el valor promedio de los residuos fue 0,0366331. Sin embargo, el promedio del error cuadrado medio obtenido en la

relación entre el coeficiente de transparencia medio mensual estimado y el coeficiente de transparencia medio mensual medido correspondió a 0,00217184 unidades aproximadamente.

Estimación de la radiación solar en la zona de estudio

Empleando la información señalada para ciertas estaciones de monitoreo incluidas en el anexo II de esta memoria, se procedió a analizar el comportamiento de la radiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal a lo largo de la zona de estudio. En este caso, se realizó un modelo matemático de estimación de la irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal para la zona central de Chile evaluando las variables astronómicas, trigonométricas, topográficas y atmosféricas que modifican de distinta magnitud la disponibilidad de radiación solar sobre la superficie terrestre.

Incorporando la variable atmosférica dentro de la rutina PINSOL a través de una serie de fórmulas matemáticas mencionadas tanto en la revisión bibliográfica como en los resultados y discusión de esta investigación, se desarrolló una secuencia de ecuaciones que permitieron estimar los valores de la irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal para la zona central de Chile. En la secuencia de ecuaciones que se resume a continuación es posible apreciar cada una de las expresiones matemáticas utilizadas para desarrollar la estimación de la radiación solar global en la zona de estudio.

Esta serie de fórmulas comienza con el cálculo de ciertas variables astronómicas dentro de las cuales se consideró el factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre estimado en unidades astronómicas (Ec. 96), la declinación solar calculada en radianes (Ec. 97) y el día angular obtenido en radianes (Ec. 98).

$$E_0 = 1,000110 + 0,034221 \cdot \cos \Gamma + 0,001280 \cdot \sin \Gamma + 0,000719 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000077 \cdot \sin 2\Gamma \quad \text{Ec. 96}$$

$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cdot \cos \Gamma + 0,070257 \cdot \sen \Gamma - 0,006758 \cdot \cos 2\Gamma + 0,000907 \cdot \sen 2\Gamma - 0,002697 \cdot \cos 3\Gamma + 0,00148 \cdot \sen 3\Gamma) \quad \text{Ec. 97}$$

$$\Gamma = \frac{2 \cdot \pi \cdot (d_n - 1)}{365} \quad \text{Ec. 98}$$

De aquí en adelante, se incorporaron ciertas variables trigonométricas y topográficas, las cuales corresponden a la rutina PINSOL. En este caso, se consideró el cálculo de la insolación potencial como función del tiempo (Ec. 99), el ángulo horario de la salida del Sol en una superficie horizontal (Ec. 100), el ángulo horario de la puesta del Sol sobre una superficie horizontal (Ec. 101) y la radiación potencial para una superficie horizontal (Ec. 102).

$$aip = 2 + 0,07 \cdot \cos\left(\frac{d_n \cdot \pi}{182,621}\right) \quad \text{Ec. 99}$$

$$w_1 = -\cos^{-1}(-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad \text{Ec. 100}$$

$$w_2 = \cos^{-1}(-\tan\phi \cdot \tan\delta) \quad \text{Ec. 101}$$

$$aish = \left(\frac{(w_2 - w_1) \cdot \sen \phi \cdot \sen \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot (\sen w_2 - \sen w_1)}{0,0043633231} \right) \quad \text{Ec. 102}$$

$$rash = E_0 \cdot aip \cdot aish \cdot \frac{4,184}{100} \quad \text{Ec. 103}$$

La rutina PINSOL finaliza con la estimación de la radiación solar extraterrestre en [MJ m⁻² dia⁻¹] sobre una superficie horizontal (Ec. 103). Es entonces cuando se incorpora la variable atmosférica a través del cálculo del coeficiente de transparencia (Ec. 104), el espesor atmosférico (Ec. 105) y la transmisividad de la atmósfera (Ec. 106), para luego iniciar la estimación de la radiación solar difusa en [MJ m⁻² dia⁻¹] sobre una superficie horizontal (Ec. 107), la radiación solar

directa en $[\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}]$ sobre una superficie horizontal (Ec. 108) y la radiación solar global en $[\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}]$ sobre una superficie horizontal (Ec. 109).

$$K = 0,626641 - 0,00689277 \cdot C^2 \quad \text{Ec. 104}$$

$$m_r = e^{(-0,000118 \cdot z)} \cdot \frac{1}{\cos \theta_z} \quad \text{Ec. 105}$$

$$\tau = K^m \quad \text{Ec. 106}$$

$$R_{\text{dif}} = 0,0741 \cdot \text{rash} \cdot (1 - \tau) \cdot (1 + \cos \beta) \quad \text{Ec. 107}$$

$$R_{\text{dir}} = 0,741 \cdot \text{rash} \cdot \tau \quad \text{Ec. 108}$$

$$R_g = R_{\text{dir}} + R_{\text{dif}} \quad \text{Ec. 109}$$

Con respecto a las ecuaciones utilizadas para estimar los valores medios mensuales de la radiación solar difusa (Ec. 107) y la radiación solar directa (Ec. 108), ambas expresiones se obtuvieron a partir de los estudios realizados por Sarmiento (1995) las cuales fueron adaptadas especialmente para la zona central de Chile.

A través de las herramientas de cálculo que ofrece el programa Excel, se procedió a calibrar cada una de las ecuaciones señaladas anteriormente. En este caso, fue necesario utilizar los valores de nubosidad media mensual expresada en octavos y registrados por 11 estaciones de medición señaladas en el anexo II, junto con la información de latitud y longitud expresada en grados y de altitud registrada en metros correspondiente a las 11 estaciones antedichas. De esta manera, los valores estimados de irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal para algunas estaciones de monitoreo situadas dentro de la zona central de Chile se presentan en el cuadro 14.

Cuadro 14: Valores estimados de la irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal a través de la secuencia matemática propuesta en el anexo V considerando algunas localidades ubicadas en la zona central de Chile.

Localidad estación de monitoreo	Radiación solar global [Ly día^{-1}]											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Faro Punta Ángeles Valparaíso	550	481	319	219	134	91	109	190	259	370	481	530
Aeropuerto Arturo Merino Benítez Ex Pudahuel	590	512	368	256	144	107	118	188	281	396	520	581
Quinta Normal	589	511	368	255	146	108	118	185	287	400	515	579
Base Aérea El Bosque	592	515	369	255	149	105	121	188	287	400	516	581
La Platina INIA	595	516	371	252	145	103	117	183	291	414	523	584
Guayacán San José De Maipo	601	524	373	257	159	99	133	211	310	422	536	587
Antena Radio Quelentaro	581	498	347	238	130	92	109	175	277	412	511	571
Cauquenes INIA	583	500	348	229	122	88	101	175	284	411	519	581
Santa Rosa De Cato	580	490	331	208	106	82	85	155	259	393	506	574
Universidad De Concepción Bellavista	555	472	305	194	97	72	82	128	242	356	455	527
Victoria FACH	533	454	299	172	89	61	69	116	220	326	435	492

A partir de los atributos que ofrece el programa Statgraphics, se realizó un análisis de regresión lineal para poder evaluar estadísticamente los valores de irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal estimados en $[\text{Ly día}^{-1}]$ para 11 estaciones de monitoreo con respecto a la información de irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal medida en $[\text{Ly día}^{-1}]$ para cada una de las estaciones mencionadas. En la figura 34 es posible apreciar la relación gráfica obtenida entre estas dos variables, donde la irradiación solar global media mensual estimada sobre una superficie horizontal corresponde a la variable independiente, mientras que, la variable dependiente esta representada por la irradiación solar global media mensual medida sobre una superficie horizontal.

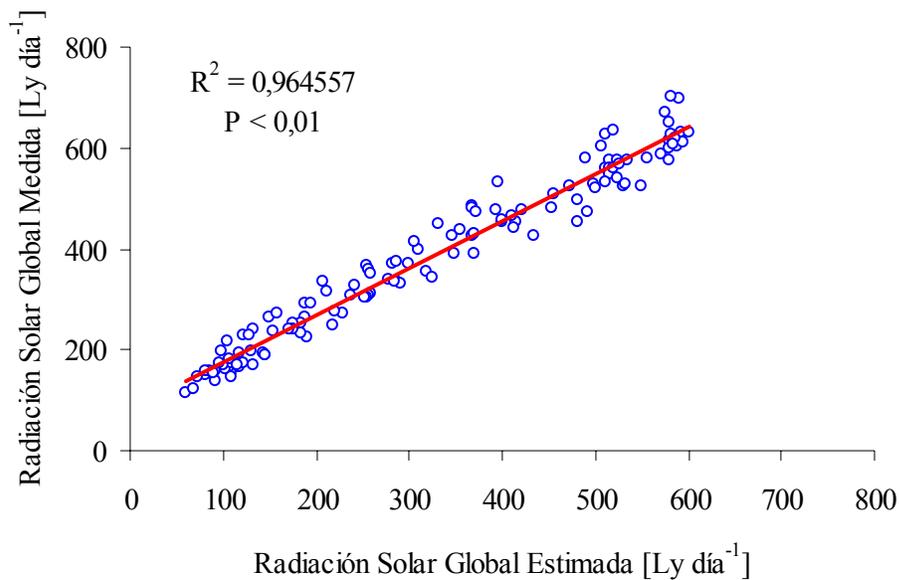


Figura 34: Regresión lineal entre los datos de irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal medida en $[\text{Ly día}^{-1}]$ que aparecen en el anexo II y los valores de irradiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal estimados en $[\text{Ly día}^{-1}]$ que se señalan en el cuadro 14, para diversas localidades ubicadas dentro de la zona central de Chile.

Para mayor información acerca de este análisis, en el cuadro 15 es posible apreciar, con un mayor detalle, los resultados obtenidos en este procedimiento a través de una tabla de datos que contiene los respectivos análisis estadísticos de la regresión lineal desarrollada entre la irradiación

solar global media mensual medida y la irradiación solar global media mensual estimada para diversas superficies horizontales consideradas dentro de la zona central de Chile.

Cuadro 15: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal entre la información de irradiación solar global media mensual medida en [Ly día^{-1}] y los valores de irradiación solar global media mensual estimada en [Ly día^{-1}], para 11 estaciones de monitoreo localizadas dentro de la zona central de Chile.

Estadísticas de la regresión	
R cuadrado	0,964557
R cuadrado ajustado	0,964285
Error standard	31,4776
Error medio absoluto	24,2105

Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	3505494,36	1	3505494,36	3537,9	0,0000
Residuos	128808,45	130	990,83		
Total	3634302,81	131			

Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P
Intercepto	81,8228	5,74431	14,2442	0,0000
Pendiente	0,929623	0,0156291	59,4802	0,0000

Al comparar los valores de irradiación solar global media mensual estimados sobre una superficie horizontal a través del modelo matemático propuesto en esta investigación y los datos de irradiación solar global medios mensuales medidos sobre una superficie horizontal, considerando en conjunto las 11 estaciones de monitoreo evaluadas para la zona central de Chile, se observa una relación estadísticamente significativa entre ambas variables en un 99% del nivel de confianza, con una probabilidad (P) inferior a 0,01. Este procedimiento evidenció que el estadístico R^2 explica el 96,4557% de la variabilidad en los valores de irradiación solar global media mensual medida en [Ly día^{-1}].

En este caso, el error standard de la estimación determina que la desviación standard de los residuos fue 31,4776. Del mismo modo, el error medio absoluto especifica que el valor promedio de

los residuos fue 24,2105. Sin embargo, el promedio del error cuadrado medio obtenido en la relación entre la irradiación solar global media mensual estimada sobre una superficie horizontal y la irradiación solar global media mensual medida sobre una superficie horizontal correspondió a 990,83 [Ly día⁻¹] aproximadamente.

Representación de la radiación solar en la zona de estudio

Mediante el uso de las herramientas de programación que ofrece el programa Qbasic, se desarrolló un modelo de simulación matemático capaz de representar la distribución espacial de la irradiación solar global media mensual sobre toda la superficie terrestre perteneciente a la zona central de Chile a través del diseño de imágenes cartográficas. Este modelo incluyó las ecuaciones empíricas desarrolladas en esta investigación para estimar los valores medios mensuales de la nubosidad atmosférica, el coeficiente de transparencia de la atmósfera y la irradiación solar global sobre una superficie horizontal, además de la rutina PINSOL.BAS publicada por la United States Department of Agriculture (2003).

En este caso, la información necesaria para calibrar esta rutina de simulación matemática correspondió a ciertas variables topográficas características de la zona central de Chile tales como la pendiente en grados, la altura en metros y la orientación en grados, junto con la latitud y la longitud en grados correspondiente a la zona de estudio. Cada una de estas variables fue obtenida en formato de imágenes cartográficas digitales a través de herramientas de análisis de superficie disponibles en el programa Idrisi Kilimanjaro, procesando la información espacial de la zona central de Chile contenida en la pieza W100S10 del DEM GTOPO30 publicada por la United States Geological Survey (2003).

De esta manera, se generaron los Modelos Digitales de Terreno necesarios correspondientes a la pendiente, la altura, la orientación, la latitud y la longitud existente en la zona de estudio, a una escala de representación de 1:1.000.000 para cada mapa cartográfico. Estas imágenes reflejaron las principales características de la topografía existente sobre la superficie terrestre de la zona central de Chile. En este caso, utilizando las herramientas proporcionadas por el programa Surfer para

editar la presentación de imágenes cartográficas, se obtuvo el Modelo Digital de Terreno que se señala en la figura 35 correspondiente a la representación espacial de la altura registrada en metros sobre el nivel del mar para la superficie terrestre de la zona de estudio.

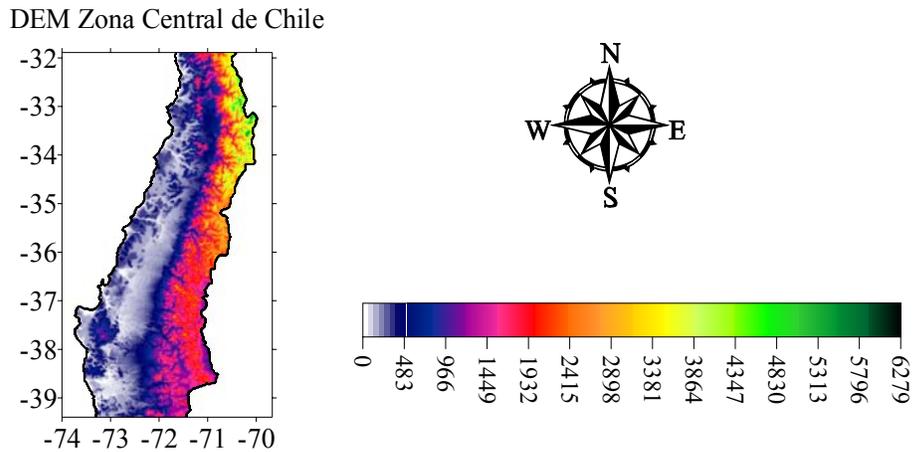


Figura 35: Modelo Digital de Terreno correspondiente a la altura sobre el nivel del mar representada en metros para la superficie terrestre de la zona central de Chile.

Considerando los antecedentes expuestos anteriormente, se procedió a desarrollar el modelo de simulación matemática para estimar la irradiación solar global media mensual sobre toda la superficie terrestre correspondiente a la zona central de Chile, cuya rutina de simulación obtenida se señala en el anexo V de esta investigación.

Al ejecutar este modelo a través de las herramientas de programación del programa Qbasic, fue posible diseñar imágenes cartográficas que representaran la distribución espacial media mensual de la irradiación solar global sobre la superficie terrestre de la zona de estudio. En la figura 36 y en la figura 37 se observa cada una de las imágenes cartográficas obtenidas para representar la distribución espacial de la irradiación solar global media mensual sobre la zona central de Chile correspondiente a los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, cuyos valores están expresados en $[MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}]$.

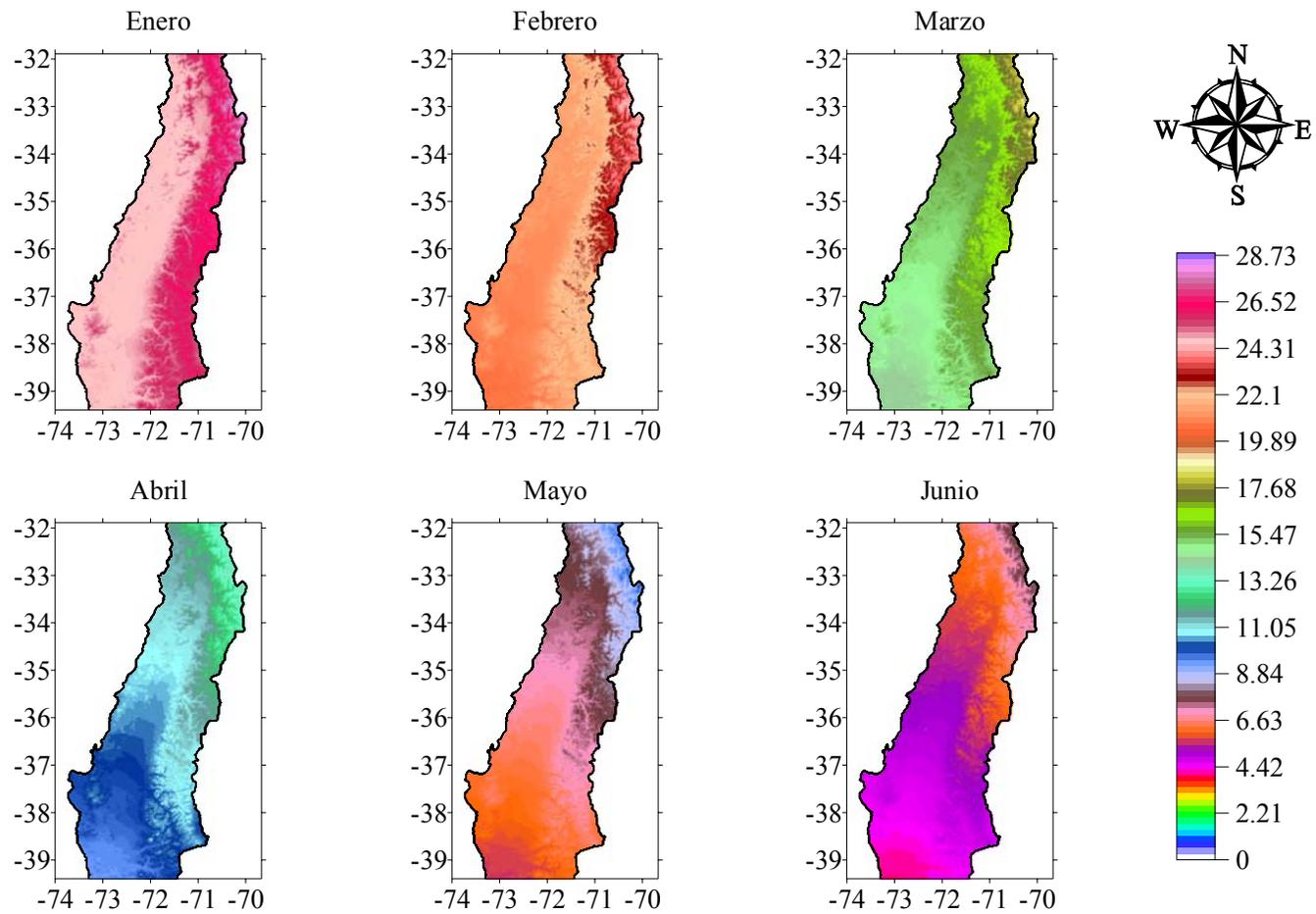


Figura 36: Cartografía de la distribución espacial de la irradiación solar global media mensual para la zona central de Chile durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo y junio, registrada en $[MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}]$ a través del modelo señalado en el anexo V.

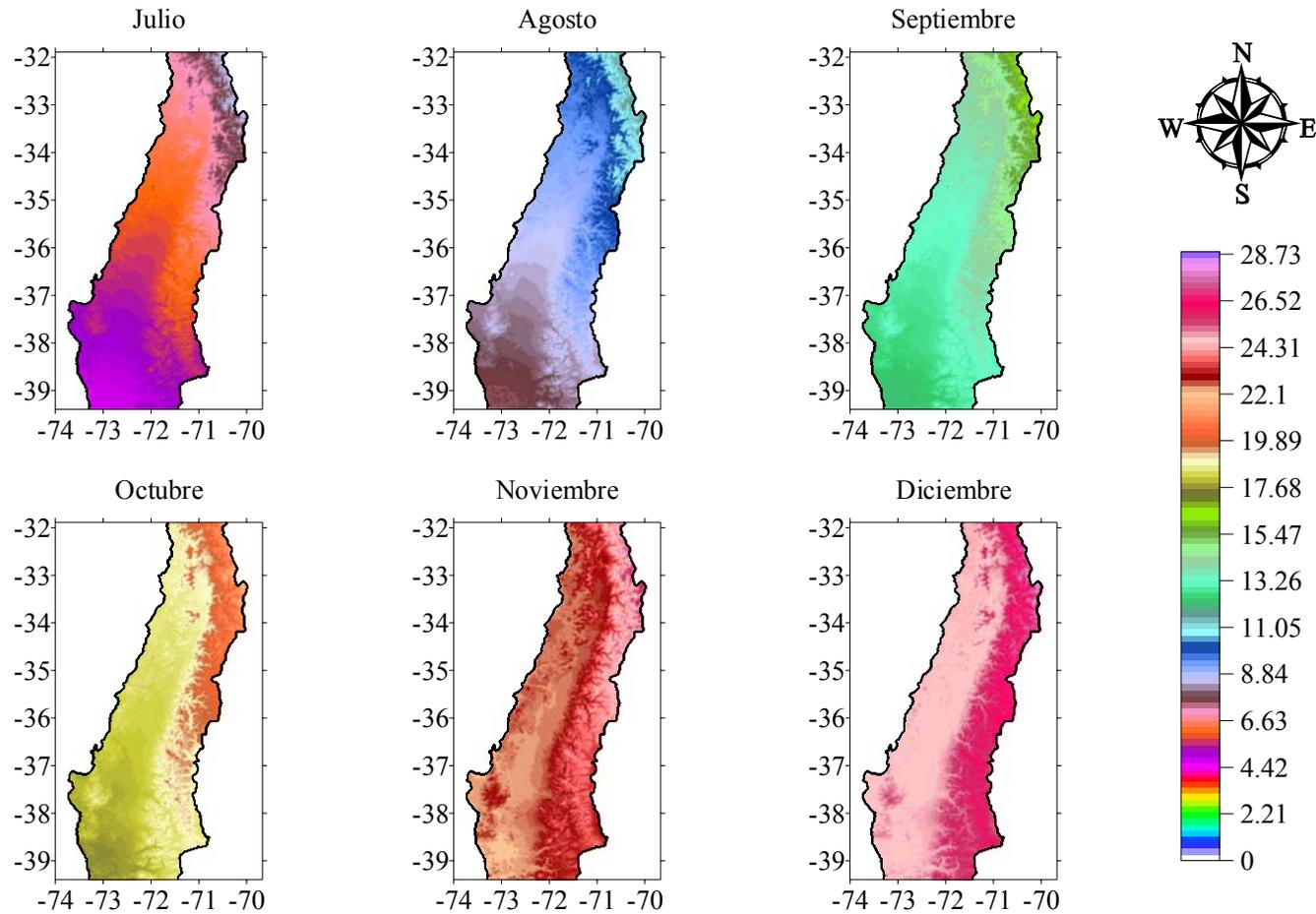


Figura 37: Cartografía de la distribución espacial de la irradiación solar global media mensual para la zona central de Chile durante los meses de julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, registrada en $[\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}]$ a través del modelo señalado en el anexo V.

Cada una de las imágenes cartográficas señaladas anteriormente fueron analizadas espacialmente a través de las herramientas ofrecidas por el programa Idrisi Kilimanjaro, para luego editarlas utilizando las herramientas disponibles en el programa Surfer. A través de la interpretación espacial de cada una de estas 12 imágenes cartográficas antedichas, se obtuvieron los valores de la irradiación solar global media mensual registrada sobre la superficie terrestre de la zona central de Chile, observándose los valores máximos de radiación solar durante los meses de diciembre y enero, mientras que los valores mínimos de radiación solar se observaron durante los meses de junio y julio.

De esta manera, la irradiación solar global media mensual para la zona de estudio manifestó una variación entre 28 [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] y 24 [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] en el mes de enero, disminuyendo paulatinamente durante los meses siguientes, hasta distinguirse un promedio de 6 [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] aproximadamente para los meses de junio y julio, para luego ir aumentando paulatinamente durante los meses siguientes, hasta registrarse una variación entre 28 [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] y 24 [$\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$] en el mes de diciembre.

Además de obtener la representación cartográfica media mensual de la irradiación solar global para la zona central de Chile, se decidió registrar la distribución espacial de la nubosidad atmosférica media mensual y el coeficiente de transparencia de la atmósfera medio mensual sobre toda la superficie terrestre de la zona de estudio. A través de la utilización de diversas expresiones matemáticas que se desarrollaron durante esta investigación, se logró representar el comportamiento espacial medio mensual de cada una de estas variables, obteniéndose imágenes cartográficas para cada mes del año. En este caso, se utilizaron las herramientas de cálculo proporcionadas por el programa Idrisi Kilimanjaro, procesando la información espacial necesaria de la zona central de Chile derivada de la pieza W100S10 del DEM GTOPO30 publicada por la United States Geological Survey (2003).

Para lograr representar la distribución espacial de la nubosidad media mensual sobre la superficie terrestre de la zona de estudio, fue necesario utilizar una expresión matemática capaz de estimar los valores medios mensuales de la cobertura nubosa. En este caso, se propuso considerar la relación entre la nubosidad y el comportamiento de los grandes centros de acción meteorológicos

característicos de la zona central de Chile, estimando los valores medios mensuales de la nubosidad atmosférica basándose en el cálculo a partir del ciclo anual que presenta el Lugar de Presión Máxima (LPM) en Chile a través de la siguiente relación matemática (Ec. 110).

$$C = A + B \cdot (LPM - LAT) \quad \text{Ec. 110}$$

En este caso, para estimar los valores del coeficiente A y B correspondiente a la zona central de Chile se propuso utilizar las expresiones matemáticas obtenidas durante la realización de esta investigación, ajustando estos coeficientes en función de la ubicación geográfica a través de las siguientes expresiones matemáticas (Ec. 111 y 112).

$$A = 426,993 - 1,07333 \cdot |LAT|^2 - 0,300196 \cdot |LON|^2 + 1,00402 \cdot |LAT| \cdot |LON| \quad \text{Ec. 111}$$

$$B = -77,3449 + 0,186145 \cdot |LAT|^2 + 0,0615251 \cdot |LON|^2 - 0,190474 \cdot |LAT| \cdot |LON| \quad \text{Ec. 112}$$

Todas estas expresiones matemáticas fueron calibradas a través de las herramientas de cálculo proporcionadas por el programa Idrisi Kilimanjaro, considerando la información espacial de la latitud y la longitud de la zona de estudio derivada del DEM GTOPO30. De esta manera, se logró diseñar las 12 imágenes cartográficas que registraron el comportamiento espacial de la nubosidad media mensual sobre la zona central de Chile, las cuales posteriormente fueron editadas utilizando las herramientas disponibles en el programa Surfer.

A través de la figura 38 y la figura 39 es posible observar cada una de las imágenes cartográficas obtenidas para representar la distribución espacial de la nubosidad atmosférica media mensual sobre la zona central de Chile correspondiente a los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, cuyos valores están expresados en octavos.

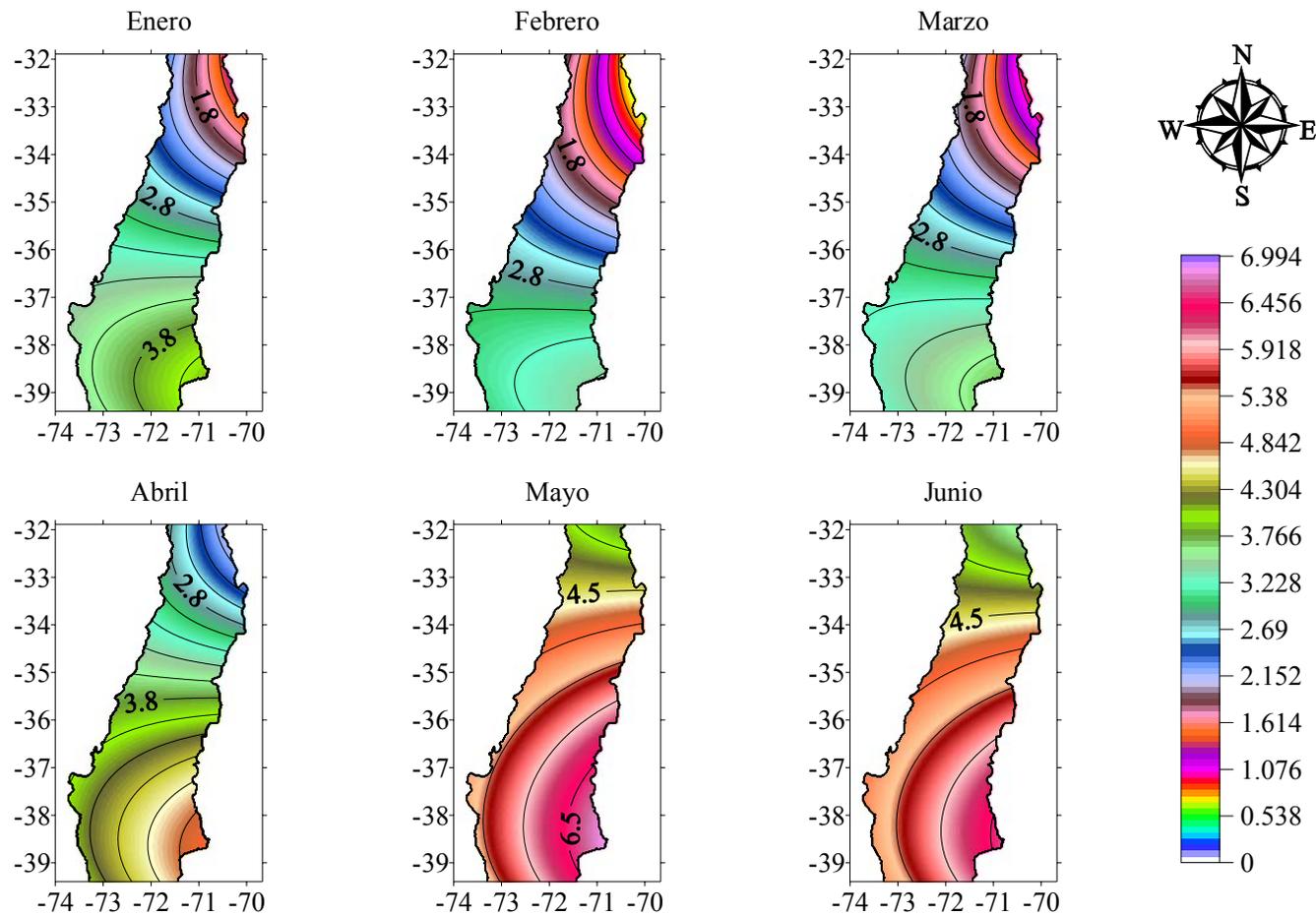


Figura 38: Cartografía de la distribución espacial de la nubosidad atmosférica media mensual para la zona central de Chile durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo y junio, registrada en octavos a través de las expresiones matemáticas desarrolladas en esta investigación.

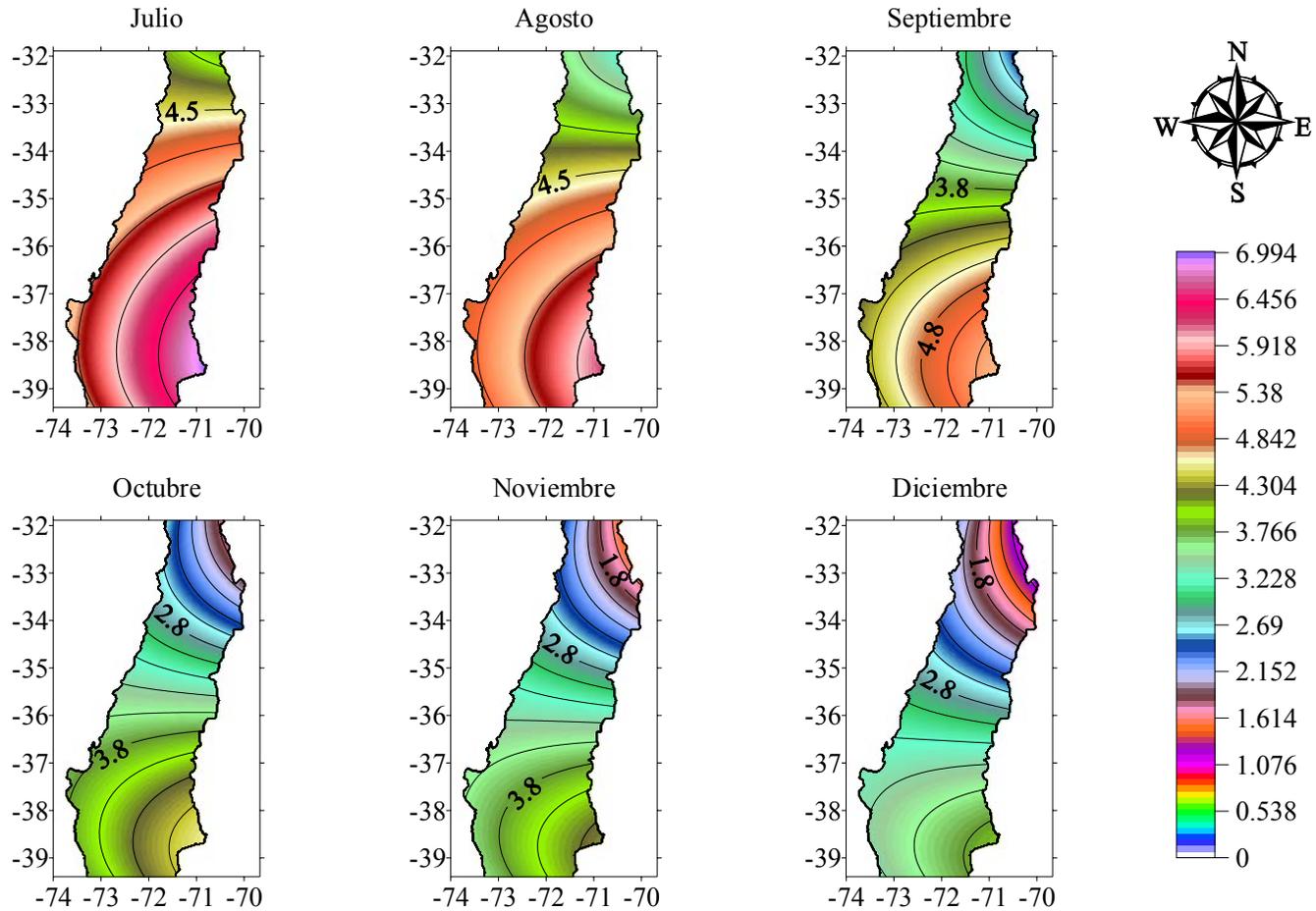


Figura 39: Cartografía de la distribución espacial de la nubosidad atmosférica media mensual para la zona central de Chile durante los meses de julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, registrada en octavos a través de las expresiones matemáticas desarrolladas en esta investigación.

Al analizar espacialmente cada una de las 12 imágenes cartográficas señaladas anteriormente fue posible observar los valores de la nubosidad media mensual registrada sobre la superficie terrestre de la zona central de Chile. De esta manera, se apreciaron los valores máximos de cobertura nubosa durante las estaciones de otoño e invierno distinguiéndose principalmente los meses de mayo y julio, mientras que los valores mínimos de nubosidad atmosférica se observaron durante las estaciones de primavera y verano reconociéndose primordialmente los meses de febrero y marzo.

En términos generales, el comportamiento espacial de la nubosidad media mensual para la zona de estudio resultó variable de acuerdo a las estaciones del año, manifestándose una variación entre 3,6 octavos y 0,9 octavos aproximadamente en el mes de marzo, aumentando paulatinamente durante los meses siguientes, hasta distinguirse una variación entre 6,5 octavos y 3,5 octavos aproximadamente para el mes de junio. Sin embargo, en el mes de septiembre se registró una variación de la nubosidad media mensual para la zona central de Chile entre 5,3 octavos y 2,5 octavos, para luego ir disminuyendo paulatinamente durante los meses siguientes, hasta registrarse una variación entre 3,8 octavos y 1,0 octavos para el mes de diciembre.

Además, analizando la distribución espacial obtenida en cada una de las imágenes cartográficas que representan los valores medios mensuales de la nubosidad atmosférica sobre la superficie terrestre de la zona de estudio, es posible interpretar una variación longitudinal en el comportamiento geográfico de esta variable. En este caso, se concentran los valores mínimos de cobertura nubosa hacia el norte de la zona central de Chile, aumentando paulatinamente hacia el sur de la zona de estudio donde se registran los valores máximos de nubosidad atmosférica.

Al igual que la metodología utilizada para obtener la representación gráfica de la distribución espacial de la nubosidad atmosférica sobre la superficie terrestre de la zona central de Chile, también fue necesario utilizar una expresión matemática capaz de estimar los valores medios mensuales del coeficiente de transparencia de la atmósfera para lograr representar la distribución espacial media mensual de esta variable atmosférica sobre la superficie terrestre de la zona de estudio. En este caso particular, se propuso considerar la relación empírica entre el coeficiente de transparencia y la nubosidad obtenido durante el desarrollo de esta investigación, estimando los

valores del coeficiente de transparencia de la atmósfera medio mensual a través de la siguiente relación matemática (Ec. 113).

$$K = 0,626641 - 0,00689277 \cdot C^2 \quad \text{Ec. 113}$$

Donde la letra K corresponde al coeficiente de transparencia expresado en unidades que varían entre cero (0) y uno (1) mientras que la variable C representa a la nubosidad expresada en octavos. En este caso, para estimar los valores del coeficiente de transparencia de la atmósfera correspondiente a la zona central de Chile a través de esta relación empírica, fue necesario disponer de los valores medios mensuales de la nubosidad de la zona de estudio. En este sentido, se decidió utilizar las imágenes cartográficas obtenidas previamente que registraban la distribución espacial de la nubosidad media mensual de la zona de estudio.

Finalmente, esta expresión matemática fue calibrada a través de las herramientas de cálculo proporcionadas por el programa Idrisi Kilimanjaro, considerando la distribución espacial de la nubosidad media mensual de la zona de estudio derivada de las imágenes cartográficas previamente obtenidas. De esta manera, se logró diseñar las 12 imágenes cartográficas que registraron el comportamiento espacial del coeficiente de transparencia medio mensual sobre la zona central de Chile, representando estos valores de acuerdo a la información espacial de latitud y longitud de la zona de estudio derivada del DEM GTOPO30. Cada una de estas fue analizada espacialmente a través de las herramientas ofrecidas por el programa Idrisi Kilimanjaro, para luego editarlas utilizando las herramientas disponibles en el programa Surfer.

En la figura 40 se aprecian cada una de las imágenes cartográficas obtenidas para representar la distribución espacial del coeficiente de transparencia de la atmósfera medio mensual sobre la zona central de Chile correspondiente a los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo y junio. En cambio, a través de la figura 41 es posible observar cada una de las imágenes cartográficas obtenidas para representar la distribución espacial de los valores medios mensuales del coeficiente de transparencia de la atmósfera sobre la zona de estudio correspondiente a los meses de julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre.

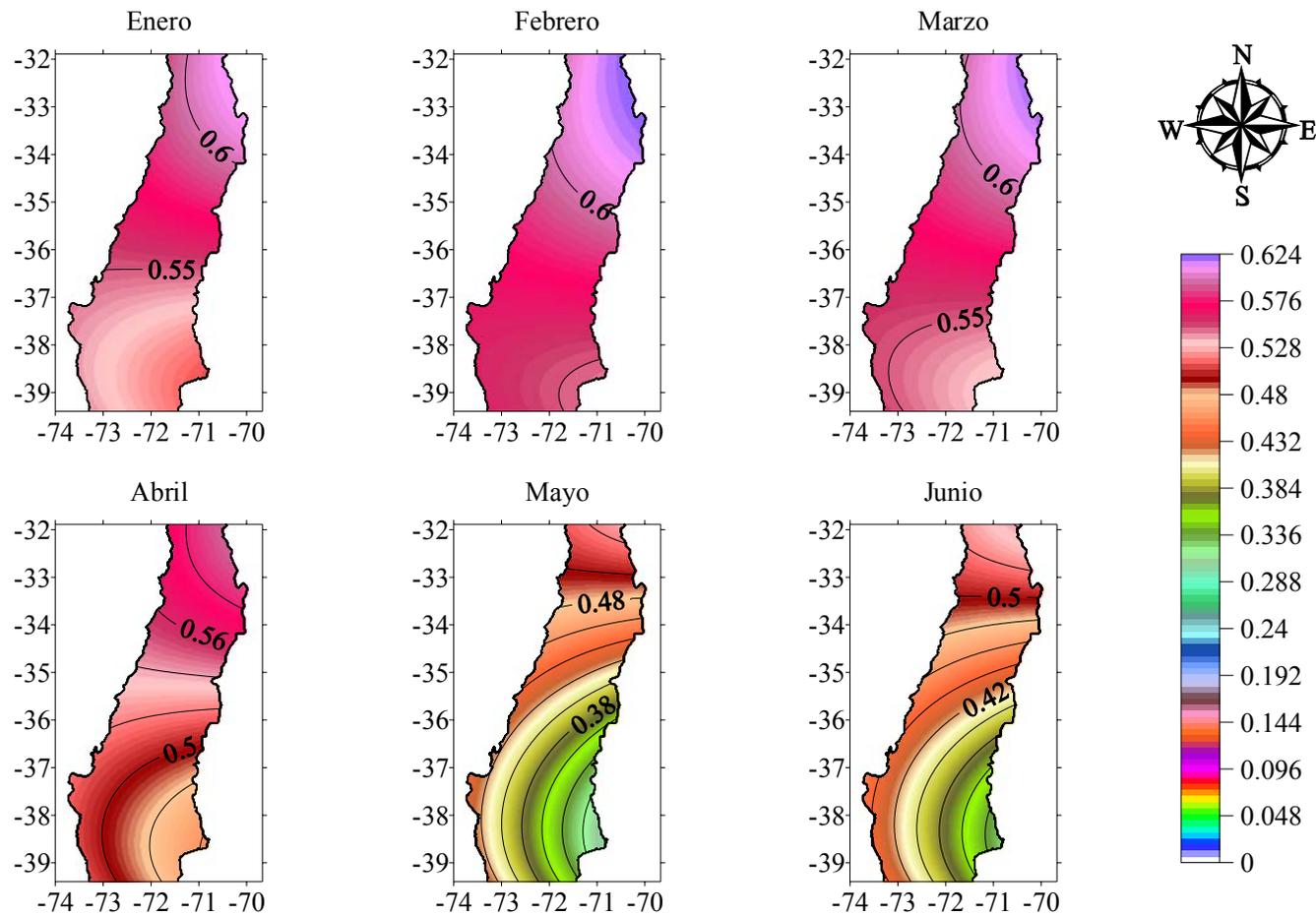


Figura 40: Cartografía de la distribución espacial del coeficiente de transparencia de la atmósfera medio mensual para la zona central de Chile durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, mayo y junio, registrada a través de las expresiones matemáticas desarrolladas en esta investigación.

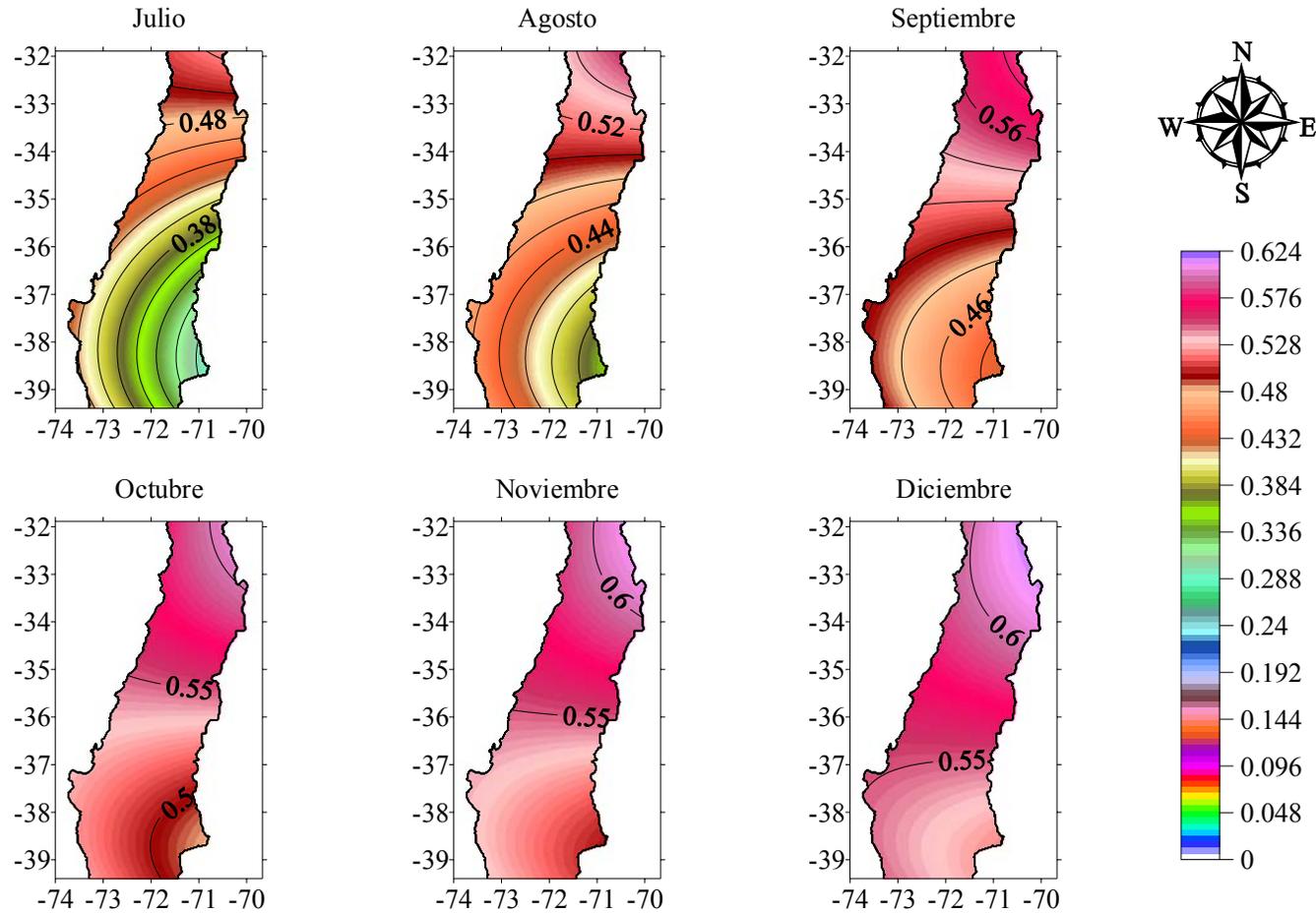


Figura 41: Cartografía de la distribución espacial del coeficiente de transparencia de la atmósfera medio mensual para la zona central de Chile durante los meses de julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre y diciembre, registrada a través de las expresiones matemáticas desarrolladas en esta investigación.

Cada una de las imágenes cartográficas señaladas anteriormente fueron analizadas espacialmente a través de las herramientas ofrecidas por el programa Idrisi Kilimanjaro, para luego editarlas utilizando las herramientas disponibles en el programa Surfer. A través de la interpretación espacial de cada una de estas 12 imágenes cartográficas antedichas, se obtuvieron los valores del coeficiente de transparencia medio mensual registrado sobre la superficie terrestre de la zona central de Chile, observándose los valores máximos de esta variable las estaciones de primavera y verano reconociéndose primordialmente el mes de febrero, mientras que los valores mínimos para este coeficiente se observaron durante las estaciones de otoño e invierno distinguiéndose principalmente el mes julio.

El comportamiento espacial del coeficiente de transparencia medio mensual para la zona de estudio resultó variable de acuerdo a las estaciones del año, sin embargo, se manifestó inversamente proporcional a la distribución espacial de la nubosidad media mensual registrada sobre la zona central de Chile. De esta manera, el coeficiente de transparencia manifestó una variación entre 0,61 unidades y 0,53 unidades aproximadamente en el mes de marzo, disminuyendo paulatinamente durante los meses siguientes, hasta distinguirse una variación entre 0,53 unidades y 0,32 unidades aproximadamente para el mes de junio. Sin embargo, en el mes de septiembre se registró una variación del coeficiente de transparencia medio mensual para la zona de estudio entre 0,58 unidades y 0,43 unidades, para luego ir aumentando paulatinamente durante los meses siguientes, hasta registrarse una variación entre 0,61 unidades y 0,52 unidades para el mes de diciembre.

Además, considerando los valores que se determinan en las imágenes cartográficas que representan gráficamente la distribución espacial del coeficiente de transparencia de la atmósfera sobre la zona central de Chile, es posible observar que la variación longitudinal en el comportamiento geográfico de esta variable es inversa a la variación longitudinal determinada por la nubosidad. En este caso, se concentran los valores máximos del coeficiente de transparencia hacia el norte de la zona de estudio, disminuyendo paulatinamente hacia el sur de la zona central de Chile donde se registran los valores mínimos de este coeficiente atmosférico.

CONCLUSIONES

La información procedente de estaciones de monitoreo que fue recopilada durante esta investigación para crear la base de datos correspondiente a la zona central de Chile, permitió conocer la realidad que existe actualmente en Chile en cuanto a la medición de ciertas variables meteorológicas, climáticas y solarimétricas. Ciertamente, en algunas estaciones de medición se encontraron registros de información incompleta, con series de medidas heterogéneas y poco representativas en el aspecto temporal, dificultando la comparación de ciertas series de datos y cuya fiabilidad termina siendo muy variable, e incluso desconocida.

Así mismo, fue posible evidenciar los problemas que resultan para discriminar los contrastes locales cuando el número de estaciones de medición es escaso y su distribución sobre la superficie terrestre es poco representativa. Pese a lo anterior, el tipo de información recabada en este estudio proporcionó una base lo suficientemente buena para el estudio y la caracterización de la radiación solar global que incide sobre la superficie terrestre de la zona central de Chile, junto con los factores que la limitan. De manera tal que, este material se convirtió en uno de los principales pilares de esta investigación a través del cual fue posible cumplir paso a paso con cada uno de los objetivos planteados inicialmente.

A partir de los antecedentes proporcionados por las estaciones de monitoreo, fue posible visualizar el comportamiento que ciertos factores atmosféricos, tales como la nubosidad de la atmósfera y el coeficiente de transparencia de la atmósfera, presentan a lo largo y ancho de la zona central de Chile, resultando una variabilidad espacio temporal compleja para ambas variables. A pesar de esta complejidad, también se observa que la distribución espacial de cada una de estas variables atmosféricas refleja una tendencia a nivel latitudinal y longitudinal. Lo anterior se demuestra a través de las diversas relaciones empíricas obtenidas durante este estudio para cada caso en particular.

La evaluación realizada a los valores medios mensuales de la nubosidad de la atmósfera ha permitido desarrollar una fórmula generalizada para la zona central de Chile, a través de la cual se hace posible la estimación de esta variable atmosférica considerando el interaccionar de los grandes centros de acción meteorológicos presentes en Chile Central. En efecto, el ciclo anual del lugar de presión máxima (LPM) en Chile ha demostrado ser un indicador válido para describir de manera simple la evolución temporal de la nubosidad de la atmósfera para cada mes del año en lugares donde no existen mediciones al respecto. De esta manera, se logró estimar la nubosidad media mensual para la zona central de Chile con una precisión del orden del 1% a partir de los valores registrados en grados de la latitud, la longitud y el lugar de presión máxima en Chile.

Por otro lado, al evaluar los valores medios mensuales del coeficiente de transparencia de la atmósfera se dió origen a una serie de ecuaciones generalizada para la zona central de Chile, cada una de las cuales hizo posible la estimación de esta variable atmosférica reflejando diversos niveles de significancia, basándose en su relación con respecto a la variación media mensual de la amplitud térmica y la nubosidad atmosférica en Chile Central. Ciertamente, cada una de estas relaciones empíricas obtenidas en este estudio entregaron distintos grados significativos, sin embargo, igualmente son útiles si se desea describir de manera simple la evolución temporal del coeficiente de transparencia de la atmósfera para cada mes del año en lugares donde no existen mediciones al respecto. De modo tal que, la estimación del coeficiente de transparencia medio mensual para la zona central de Chile puede obtenerse con una precisión razonable del orden del 5% a partir de la ecuación validada en esta investigación.

Así mismo, la rutina PINSOL publicada por la United States Department of Agriculture (2003) que cuantifica la disponibilidad de energía solar sobre la superficie terrestre asociada a factores astronómicos, trigonométricos y topográficos, ha permitido construir una herramienta de cálculo generalizada para la zona de Chile Central, a través de la cual se logra estimar los valores medios mensuales de la radiación solar global sobre una superficie horizontal considerando además los factores atmosféricos. Efectivamente, introduciendo en esta rutina el cálculo del coeficiente de transparencia, el espesor atmosférico, la transmisividad de la atmósfera y la radiación solar difusa y directa sobre una superficie horizontal, fue posible estimar la radiación solar global media mensual sobre una superficie horizontal para la zona central de Chile con una precisión razonable del orden

del 1% considerando los factores astronómicos, trigonométricos, topográficos y atmosféricos. Esta discusión demuestra las posibilidades de utilización de esta rutina matemática, concluyéndose que el modelo propuesto resulta ser un instrumento de gran utilidad para generar una base de datos completa que permita analizar las principales características de la zona central de Chile con respecto a la información de energía solar disponible, basándose en un funcionamiento simple y accesible a todo usuario.

No obstante, a partir de las relaciones empíricas contenidas en este modelo se hizo posible además la construcción de cartografía, que permitió representar gráficamente a lo largo y ancho de la zona de Chile Central la distribución espacial los valores medios mensuales de la radiación solar global, la nubosidad de la atmósfera y el coeficiente de transparencia de la atmósfera, bastando solamente con utilizar la información registrada en el DEM GTOPO30. La naturaleza y característica de estas imágenes reflejaron una relación proporcional entre la radiación solar global y el coeficiente de transparencia, en cambio, resultó ser inversamente proporcional la relación entre la radiación solar global y la nubosidad. En efecto, mientras aumentaban los valores medios mensuales de la nubosidad, disminuían los valores medios mensuales del coeficiente de transparencia y de la radiación solar global, y viceversa.

Empleando una metodología basada en análisis de tipo teórico, estadístico y espacial, este proyecto de investigación ha entregado algunas nuevas perspectivas frente al problema del estudio de la energía solar como recurso energético natural. Seguramente la presente memoria contribuirá en cuanto a la importancia que se le debería otorgar, no solo al recurso solar, sino a la gran variedad de recursos energéticos disponibles en Chile. Así mismo, es indispensable hacer notar la necesidad de seguir realizando y perfeccionando este tipo de análisis enfocados en la diversidad geográfica y climática característica del territorio chileno.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D. Y SMITH, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO. [En línea]. Disponible en: <<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e07.htm>. Consulta: 12 de Abril del 2006.
- ALONSO, M. Y FINN, E. J. 1970. Física Vol. II: Campos y ondas. Fondo Educativo Interamericano, S.A. Bogotá, Caracas, México, Panamá, San Juan, Santiago, Sao Paulo. 1000 p.
- ANTONIOLETTI, R. 1992. Estimation regionale du rayonnement solaire global dans le Chili aride et semiaride. INRA. Station de Bioclimatologie. 12 p.
- ARATA, A. Y ICAZATEGUI, S. 1984. Datos y métodos para proyectos de energía solar. Universidad Técnica Federico Santa María, Facultad de Mecánica. Valparaíso. 90 p.
- ASTROMÍA. 2003b. Fotos: Historia de la astronomía. [En línea]. Disponible en: <<http://www.astromia.com/fotohistoria/index.htm>. Consulta: 20 de Mayo del 2005.
- BARREDO, J. I. 1996. Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la ordenación del territorio. RA-MA Editorial. 264 p.
- BINDI, M. Y MIGLIETTA, F. 1991. Estimating daily global radiation from air temperature and rainfall measurements. Climate Research. 1, 117-124 p.
- CAMPBELL, G. 1995. Introducción a la biofísica ambiental. Barcelona EUB. 188 p.
- CAÑADA, J. Y SALVADOR, D. 1997. Radiación solar: Tablas de datos medidos en Valencia 1989-1995. Universidad Politécnica de Valencia. 186 p.

CASTILLO, H. Y SANTIBÁÑEZ, F. 1981. Evaluación de la radiación solar global y luminosa en Chile: Calibración de fórmulas para estimar radiación solar global diaria. *Agricultura Técnica*. 41, 145-152 p.

COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO Y CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES. 1997. Cálculo y cartografía de la evapotranspiración potencial en Chile. Editorial Comisión Nacional de Riego, CIREN-CORFO. 54 p.

DE FRANCISCO, A. Y CASTILLO, M. 1985. Energía solar: Diseño y dimensionamiento de instalaciones, especial atención a las instalaciones de tipo agrario. Publicaciones del Monte de Piedad y Caja de Ahorros de Córdoba. 421 p.

DONATELLI, M., BELLOCCHI, G. Y FONTANA, F. 2002. RadEst3.00: software to estimate daily radiation data from commonly available meteorological variables. *European Journal of Agronomy*. 00, 1-5 p.

FELICÍSIMO, A. M. 1994. Modelos digitales de Terreno: Introducción y aplicación en las ciencias ambientales. [En línea]. Disponible en: <<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/pdf/libromdt.pdf>>. Consulta: 10 de Julio del 2003.

FELICÍSIMO, A. M. 1999. Aplicaciones de los modelos digitales del terreno en los estudios del medio físico. [En línea]. Disponible en: <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/pdf/ITGE_150a.pdf>. Consulta: 10 de Julio del 2003.

FLORES, H. Y BALDASANO, J. M. 2001. Solar radiation mapping from NOAA AVHRR data in Catalonia (Spain). *Journal of Applied Meteorology*. 40, 1821-1834 p.

FLORES, H., BALDASANO, J. M., VERA, N. Y NADAL, P. 2002. Radiación solar en las Islas Baleares mediante imágenes de satélite. *Recent advances in quantitative remote sensing*. Editor José A. Sobrino. Universitat de València. 261-267 p.

FREDES, C. 1993. Guía para el estudio de la historia y geografía de Chile. Ediciones Pedagógicas Chilenas S.A. Chile. 84 p.

HUBER, A. 1977a. Aporte a la climatología y climaecología de Chile: Radiación potencial. Medio Ambiente. 2, 22-34 p.

HUBER, A. 1977b. Aporte a la climatología y climaecología de Chile: Nubosidad y radiación efectiva. Medio Ambiente. 3, 3-14 p.

IQBAL, M. 1983. An introduction to solar radiation. Academic Press. 390 p.

LIYOU, 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.

MAIZTEGUI, A. P. 1958. Introducción a la física II. Editorial Kapelusz, Buenos Aires. 564 p.

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.

OFICINA METEOROLÓGICA DE CHILE. 1965. Climatología de Chile: Valores normales de 36 estaciones seleccionadas, período 1916-1945. Editorial ENDESA, Chile. 47 p.

PARRA, J. C. Y MORALES, L. J. 1994. El lugar de presión máxima en Chile y la evolución temporal de algunas variables climáticas en Concepción. Actas III Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra, Chile.

ROMERO, H. 1985. Geografía de Chile Tomo XI: Geografía de los climas. Editorial Instituto Geográfico Militar, Chile. 243 p.

SAAVEDRA, N. 1985. Modelo climático simple para Concepción. GEOACTA. 13, 13-26 p.

SAAVEDRA, N. Y FOPPIANO, A. 1992a. Contribución a la cinemática del anticiclón del pacífico sur. GEOACTA. 19, 95-110 p.

SAAVEDRA, N. Y FOPPIANO, A. 1992b. Modelo empírico de un descriptor climático para la región central de Chile. GEOACTA. 19, 155-165 p.

SAAVEDRA, N. Y FOPPIANO, A. 1992c. Monthly mean pressure model for Chile. International Journal of Climatology. 12, 469-480 p.

SARMIENTO, P. 1995. Energía solar: Aplicaciones e ingeniería. Ediciones Universitarias de la Universidad Católica de Valparaíso. 261 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). 2003. PINSOL. [En línea]. Disponible en: <<http://www.usda.gov>>. Consulta: 10 de Septiembre del 2003.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). 2003. GTOPO30. [En línea]. Disponible en: <<http://www.usgs.gov>>. Consulta: 20 de Septiembre del 2003.

VIAL, G. Y HERNÁNDEZ, H. 1985. Historia y geografía de Chile. Editorial Santillana del Pacífico S.A. Chile. 270 p.

WHITEMAN, C. Y ALLWINE, K. 1986. Extraterrestrial solar radiation on inclined surfaces. Environmental Software. 1 (3), 164-169 p.

WIGHT, J. R. 1987. ERHYM-II: Model description and user guide for the Basic version. U. S. Department of Agriculture. Agricultural Research Results.

ANEXO I: INFORMACIÓN RECOPIADA A PARTIR DE LOS REGISTROS DE
ESTACIONES DE MONITOREO PUBLICADOS POR ARATA Y ICAZATEGUI (1984)

Cuadro 16: Información registrada en las estaciones de monitoreo publicadas por Arata y Icazategui (1984) para distintas localidades ubicadas dentro de la zona central de Chile.

Localidad estación de monitoreo	Latitud (S)	Longitud (W)	Altura (m)	Nubosidad (octavos)											
				Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Vallenar	28° 35'	70° 46'	470	1,9	1,7	1,9	2,3	2,6	3,0	3,1	2,6	2,3	2,7	2,1	1,8
La Serena	29° 54'	71° 15'	32	4,3	4,2	4,2	5,2	5,4	4,8	5,2	5,0	4,8	5,2	4,8	4,4
Coquimbo	29° 55'	71° 22'	25	4,1	4,2	4,3	4,9	5,3	4,7	4,9	4,7	4,7	4,8	4,3	4,2
Vicuña	30° 02'	70° 44'	620	0,9	0,6	0,7	1,8	2,7	2,4	2,5	2,3	2,5	1,7	1,1	0,6
Ovalle	30° 36'	71° 12'	220	1,5	1,7	2,0	2,9	3,4	3,7	4,1	3,8	5,5	3,2	2,6	2,0
Quillota	32° 53'	71° 61'	128	1,8	2,1	1,6	2,8	4,0	4,2	4,3	4,2	4,1	3,8	2,8	2,0
Llay-Llay	32° 50'	70° 59'	385	1,2	0,7	0,9	2,0	3,7	3,6	3,3	3,1	3,6	2,3	1,7	0,7
Los Andes	32° 50'	70° 37'	816	1,3	1,3	1,4	2,2	4,2	4,6	4,2	4,4	3,9	3,6	2,7	1,6
Valparaíso	33° 01'	71° 38'	41	3,2	3,3	3,0	4,1	4,9	4,9	4,9	4,7	4,5	4,3	3,7	3,0
Santiago	33° 27'	70° 42'	520	1,4	1,6	1,8	2,8	4,6	5,0	4,4	4,8	4,3	3,9	3,0	1,9
Rancagua	34° 10'	70° 45'	500	1,4	1,4	1,8	2,7	5,0	4,6	5,1	4,6	3,6	3,8	3,1	2,0
El Teniente	34° 06'	70° 22'	2.134	1,6	1,8	1,4	2,4	4,5	4,9	4,2	4,5	3,9	3,8	3,4	2,4
San Fernando	34° 35'	71° 00'	342	1,3	1,6	1,9	3,4	5,3	5,7	5,1	5,1	4,8	4,3	3,3	2,1
Curicó	34° 58'	71° 13'	225	1,3	1,3	1,9	3,5	5,5	5,6	5,5	4,9	4,4	4,0	3,1	2,5
Molina	35° 05'	71° 16'	235	2,3	1,9	2,7	4,0	5,2	5,4	5,8	4,8	5,0	4,3	3,3	3,2

(continúa)

Cuadro 16: (Continuación).

Localidad estación de monitoreo	Latitud (S)	Longitud (W)	Altura (m)	Nubosidad (octavos)											
				Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Talca	35° 26'	71° 40'	97	1,3	1,3	1,9	3,3	5,2	5,4	5,3	4,8	4,2	3,5	2,7	1,8
Constitución	35° 20'	72° 56'	7	2,2	1,9	2,9	3,6	4,0	4,9	4,8	4,1	4,0	4,0	3,3	2,9
Punta Carranza	35° 36'	72° 38'	30	2,4	3,0	3,0	4,0	5,1	5,2	5,0	4,0	4,2	3,9	3,4	2,9
Linares	35° 51'	71° 36'	157	1,5	1,6	2,3	3,8	5,4	5,9	5,8	5,0	4,5	4,4	3,5	2,4
Cauquenes	35° 59'	72° 22'	177	2,7	2,3	3,6	4,7	5,5	6,4	5,6	5,6	5,2	4,1	4,1	3,8
Chillán	36° 36'	72° 02'	118	1,1	1,5	2,6	3,3	5,2	5,7	5,4	5,1	4,6	4,3	3,5	2,3
Punta Tumbes	36° 37'	73° 06'	120	2,3	3,0	3,1	4,2	5,0	5,3	5,1	5,0	4,4	4,0	3,3	3,0
Talcahuano	36° 43'	73° 07'	84	2,2	2,3	2,7	3,4	4,8	4,8	4,7	4,5	4,3	3,7	3,1	2,4
Concepción	36° 50'	73° 02'	15	2,7	2,3	3,4	4,3	5,4	5,5	4,9	5,3	4,6	4,5	4,2	3,2
Los Ángeles	37° 28'	72° 21'	130	2,2	2,2	2,6	3,8	5,5	5,3	5,5	5,0	4,2	4,2	3,5	3,2
Angol	37° 49'	72° 39'	77	2,3	2,7	3,1	4,1	5,6	6,0	5,6	5,0	4,4	3,8	4,3	3,1
Contulmo	38° 02'	73° 12'	38	2,3	2,6	3,1	3,9	5,1	5,4	5,1	4,9	4,7	4,3	3,8	3,5
Traiguén	38° 15'	72° 40'	170	2,6	2,9	3,4	4,4	5,6	6,1	5,9	5,6	5,0	4,6	3,9	3,5
Lonquimay	38° 26'	71° 15'	900	2,8	2,5	4,2	4,9	5,9	6,6	6,2	5,7	4,8	4,5	4,2	3,8
Temuco	38° 45'	72° 35'	114	3,7	3,9	4,4	5,1	6,0	6,2	6,1	5,8	5,4	5,3	4,9	4,7
Puerto Domínguez	38° 54'	73° 14'	5	3,5	3,9	4,0	4,8	6,0	5,7	5,8	5,3	5,2	4,1	4,8	4,2

ANEXO II: INFORMACIÓN RECOPIADA A PARTIR DE LOS REGISTROS DE
ESTACIONES DE MONITOREO PUBLICADOS POR LA COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO
Y EL CENTRO DE INFORMACIÓN DE RECURSOS NATURALES (1997)

Cuadro 17: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Faro Punta Angeles Valparaíso.

Estación Faro Punta Angeles Valparaíso
 Latitud 33° 01' S
 Longitud 71° 39' W
 Altura 41 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	22,40	13,20	2,90	524,00	6,09	1026,05	11,93	0,51
Febrero	22,20	13,10	2,70	452,00	5,26	928,90	10,80	0,49
Marzo	21,00	12,10	4,00	354,00	4,12	729,27	8,48	0,49
Abril	19,00	10,80	4,30	249,00	2,90	589,97	6,86	0,42
Mayo	17,30	10,20	4,80	170,00	1,98	454,76	5,29	0,37
Junio	15,80	9,00	5,60	137,00	1,59	389,81	4,53	0,35
Julio	15,40	8,50	5,20	155,00	1,80	415,98	4,84	0,37
Agosto	15,80	8,40	3,80	225,00	2,62	524,22	6,09	0,43
Septiembre	16,70	8,90	4,80	313,00	3,64	678,17	7,88	0,46
Octubre	17,90	9,80	4,60	392,00	4,56	837,13	9,73	0,47
Noviembre	20,00	11,10	3,80	496,00	5,77	956,76	11,13	0,52
Diciembre	21,50	12,40	3,60	526,00	6,12	1013,61	11,79	0,52

Cuadro 18: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Lliu-Lliu.

Estación Lliu-Lliu
 Latitud 33° 04' S
 Longitud 71° 14' W
 Altura 250 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	27,80	11,80	s/i	584,00	6,79	1026,09	11,93	0,57
Febrero	26,40	11,60	s/i	506,00	5,88	928,74	10,80	0,54
Marzo	25,60	10,40	s/i	426,00	4,95	728,90	8,48	0,58
Abril	22,80	8,90	s/i	304,00	3,53	589,41	6,85	0,52
Mayo	19,60	8,10	s/i	206,00	2,40	454,13	5,28	0,45
Junio	16,30	6,40	s/i	164,00	1,91	389,15	4,52	0,42
Julio	15,70	5,80	s/i	176,00	2,05	415,33	4,83	0,42
Agosto	16,70	6,00	s/i	248,00	2,88	523,62	6,09	0,47
Septiembre	18,40	6,50	s/i	337,00	3,92	677,72	7,88	0,50
Octubre	21,00	8,20	s/i	419,00	4,87	836,89	9,73	0,50
Noviembre	24,30	9,90	s/i	509,00	5,92	956,73	11,13	0,53
Diciembre	26,20	11,20	s/i	575,00	6,69	1013,71	11,79	0,57

Cuadro 19: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Aeropuerto Arturo Merino Benítez Ex Pudahuel.

Estación Aeropuerto Arturo Merino Benítez Ex Pudahuel
 Latitud 33° 24' S
 Longitud 70° 47' W
 Altura 475 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	29,90	11,50	1,10	697,00	8,10	1026,34	11,93	0,68
Febrero	29,30	10,70	1,20	625,00	7,27	927,62	10,79	0,67
Marzo	27,10	8,70	1,70	483,00	5,62	726,42	8,44	0,67
Abril	23,10	5,90	2,40	309,00	3,59	585,72	6,81	0,53
Mayo	18,40	4,60	4,30	194,00	2,26	449,86	5,23	0,43
Junio	14,80	2,80	4,60	165,00	1,92	384,73	4,48	0,43
Julio	14,70	2,50	4,70	193,00	2,24	410,99	4,78	0,47
Agosto	16,40	3,30	4,10	266,00	3,09	519,68	6,05	0,51
Septiembre	18,80	4,70	4,20	369,00	4,29	674,68	7,85	0,55
Octubre	22,10	6,50	4,00	533,00	6,20	835,24	9,71	0,64
Noviembre	25,70	8,50	2,60	636,00	7,40	956,55	11,13	0,66
Diciembre	28,60	10,40	1,70	702,00	8,16	1014,34	11,79	0,69

Cuadro 20: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Quinta Normal.

Estación Quinta Normal
 Latitud 33° 26' S
 Longitud 70° 42' W
 Altura 520 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	29,40	12,90	1,30	604,00	7,02	1026,36	11,93	0,59
Febrero	29,10	12,30	1,40	558,00	6,49	927,50	10,79	0,60
Marzo	26,80	10,60	1,80	426,00	4,95	726,17	8,44	0,59
Abril	23,00	8,00	2,50	304,00	3,53	585,35	6,80	0,52
Mayo	18,30	6,40	4,20	191,00	2,22	449,43	5,22	0,43
Junio	14,80	4,40	4,50	144,00	1,67	384,29	4,47	0,38
Julio	14,60	3,90	4,70	166,00	1,93	410,56	4,78	0,40
Agosto	16,30	4,70	4,30	232,00	2,70	519,29	6,03	0,45
Septiembre	18,90	6,30	4,00	336,00	3,91	674,38	7,84	0,50
Octubre	22,10	8,20	3,90	452,00	5,26	835,07	9,71	0,54
Noviembre	25,50	10,00	2,90	557,00	6,48	956,53	11,13	0,58
Diciembre	28,30	12,00	1,90	616,00	7,16	1014,40	11,79	0,61

Cuadro 21: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Base Aérea El Bosque.

Estación Base Aérea El Bosque
 Latitud 33° 33' S
 Longitud 70° 40' W
 Altura 568 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	28,40	12,10	1,10	632,00	7,35	1026,45	11,93	0,62
Febrero	28,40	11,70	1,10	576,00	6,70	927,10	10,78	0,62
Marzo	25,90	10,10	1,70	481,00	5,59	725,30	8,43	0,66
Abril	22,00	7,40	2,50	368,00	4,28	584,06	6,79	0,63
Mayo	17,20	5,40	4,00	263,00	3,06	447,93	5,21	0,59
Junio	13,40	3,80	4,70	215,00	2,50	382,74	4,45	0,56
Julio	13,70	3,20	4,50	229,00	2,66	409,04	4,76	0,56
Agosto	15,60	3,60	4,10	292,00	3,40	517,90	6,02	0,56
Septiembre	18,00	5,00	4,00	375,00	4,36	673,31	7,83	0,56
Octubre	21,00	6,80	3,90	456,00	5,30	834,48	9,70	0,55
Noviembre	25,10	9,20	2,90	559,00	6,50	956,45	11,12	0,58
Diciembre	27,20	11,10	1,80	628,00	7,30	1014,61	11,80	0,62

Cuadro 22: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de La Platina INIA.

Estación La Platina INIA
 Latitud 33° 34' S
 Longitud 70° 37' W
 Altura 625 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	28,30	10,60	0,90	610,00	7,09	1026,46	11,93	0,59
Febrero	27,90	9,90	1,10	549,00	6,38	927,05	10,78	0,59
Marzo	25,70	8,60	1,60	430,00	5,00	725,17	8,43	0,59
Abril	22,10	6,00	2,80	304,00	3,53	583,87	6,79	0,52
Mayo	17,90	4,80	4,30	191,00	2,22	447,72	5,21	0,43
Junio	14,20	3,20	4,90	163,00	1,90	382,52	4,44	0,43
Julio	14,30	2,60	4,80	172,00	2,00	408,82	4,76	0,42
Agosto	15,70	3,20	4,40	251,00	2,92	517,71	6,02	0,48
Septiembre	17,90	4,40	3,90	330,00	3,84	673,15	7,83	0,49
Octubre	21,10	6,30	3,40	455,00	5,29	834,40	9,70	0,55
Noviembre	24,20	8,20	2,60	540,00	6,28	956,44	11,12	0,56
Diciembre	27,00	9,80	1,70	611,00	7,10	1014,64	11,80	0,60

Cuadro 23: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Guayacán San José De Maipo.

Estación Guayacán San José De Maipo
 Latitud 33° 36' S
 Longitud 70° 21' W
 Altura 1.060 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	28,30	10,60	1,20	630,00	7,33	1026,48	11,93	0,61
Febrero	27,70	9,20	1,10	576,00	6,70	926,93	10,78	0,62
Marzo	25,50	8,50	2,00	474,00	5,51	724,92	8,43	0,65
Abril	22,30	6,00	2,90	359,00	4,17	583,50	6,78	0,62
Mayo	19,50	5,10	3,70	270,00	3,14	447,29	5,20	0,60
Junio	15,20	3,00	5,40	198,00	2,30	382,08	4,44	0,52
Julio	16,30	2,70	4,00	239,00	2,78	408,39	4,74	0,59
Agosto	16,80	3,00	3,10	316,00	3,67	517,31	6,01	0,61
Septiembre	18,20	3,90	3,30	397,00	4,62	672,85	7,83	0,59
Octubre	20,50	5,90	3,40	476,00	5,53	834,23	9,70	0,57
Noviembre	23,90	8,40	2,40	576,00	6,70	956,42	11,12	0,60
Diciembre	26,10	10,30	2,10	619,00	7,20	1014,70	11,80	0,61

Cuadro 24: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Embalse El Yeso DGA.

Estación Embalse El Yeso DGA
 Latitud 33° 40' S
 Longitud 70° 09' W
 Altura 2.475 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	19,90	8,80	s/i	578,00	6,72	1026,52	11,94	0,56
Febrero	19,90	8,50	s/i	538,00	6,26	926,70	10,78	0,58
Marzo	18,80	8,20	s/i	453,00	5,27	724,42	8,42	0,63
Abril	14,50	5,50	s/i	340,00	3,95	582,76	6,78	0,58
Mayo	9,90	1,90	s/i	210,00	2,44	446,44	5,19	0,47
Junio	6,90	-0,30	s/i	210,00	2,44	381,20	4,43	0,55
Julio	4,60	-1,90	s/i	199,00	2,31	407,52	4,73	0,49
Agosto	6,70	-1,70	s/i	287,00	3,34	516,52	6,00	0,56
Septiembre	8,70	0,00	s/i	390,00	4,53	672,23	7,81	0,58
Octubre	12,50	2,40	s/i	466,00	5,42	833,89	9,70	0,56
Noviembre	15,50	5,20	s/i	500,00	5,81	956,38	11,12	0,52
Diciembre	19,10	8,10	s/i	529,00	6,15	1014,82	11,80	0,52

Cuadro 25: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Melipilla ENDESA.

Estación Melipilla ENDESA
 Latitud 33° 41' S
 Longitud 71° 13' W
 Altura 169 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	27,00	10,70	s/i	592,00	6,88	1026,54	11,94	0,58
Febrero	27,60	10,20	s/i	525,00	6,10	926,64	10,78	0,57
Marzo	25,60	9,30	s/i	402,00	4,67	724,30	8,42	0,56
Abril	22,50	7,50	s/i	258,00	3,00	582,57	6,78	0,44
Mayo	18,60	6,80	s/i	164,00	1,91	446,22	5,19	0,37
Junio	15,00	5,40	s/i	148,00	1,72	380,98	4,43	0,39
Julio	14,90	5,50	s/i	146,00	1,70	407,30	4,73	0,36
Agosto	16,60	5,30	s/i	220,00	2,56	516,32	6,00	0,43
Septiembre	18,70	6,30	s/i	333,00	3,87	672,08	7,81	0,50
Octubre	21,70	7,20	s/i	453,00	5,27	833,81	9,70	0,54
Noviembre	24,00	8,70	s/i	497,00	5,78	956,37	11,12	0,52
Diciembre	26,40	10,30	s/i	543,00	6,31	1014,85	11,80	0,53

Cuadro 26: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Antena Radio Quelentaro.

Estación Antena Radio Quelentaro
 Latitud 34° 02' S
 Longitud 71° 35' W
 Altura 260 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	27,70	13,20	1,60	600,00	6,98	1026,75	11,94	0,58
Febrero	26,90	13,10	1,90	528,00	6,14	925,41	10,76	0,57
Marzo	25,20	11,90	2,70	426,00	4,95	721,64	8,40	0,59
Abril	22,30	10,50	3,10	308,00	3,58	578,66	6,73	0,53
Mayo	17,50	9,30	4,80	198,00	2,30	441,72	5,14	0,45
Junio	14,00	7,40	5,30	156,00	1,81	376,33	4,37	0,41
Julio	13,50	6,60	4,90	175,00	2,03	402,73	4,69	0,43
Agosto	14,90	6,80	4,40	251,00	2,92	512,15	5,95	0,49
Septiembre	17,40	7,50	4,10	340,00	3,95	668,85	7,78	0,51
Octubre	20,10	8,60	3,10	440,00	5,12	832,02	9,67	0,53
Noviembre	23,70	10,70	2,80	533,00	6,20	956,12	11,12	0,56
Diciembre	25,90	12,10	2,10	586,00	6,81	1015,47	11,80	0,58

Cuadro 27: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Puente Arqueado ENDESA.

Estación Puente Arqueado ENDESA
 Latitud 34° 17' S
 Longitud 71° 21' W
 Altura 119 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	28,20	12,80	s/i	651,00	7,57	1026,88	11,94	0,63
Febrero	27,50	11,90	s/i	596,00	6,93	924,51	10,76	0,64
Marzo	25,50	10,20	s/i	487,00	5,66	719,73	8,37	0,68
Abril	22,20	8,20	s/i	360,00	4,19	575,85	6,70	0,63
Mayo	18,10	7,50	s/i	238,00	2,77	438,50	5,10	0,54
Junio	14,40	6,20	s/i	196,00	2,28	373,02	4,34	0,53
Julio	14,00	5,30	s/i	218,00	2,53	399,46	4,65	0,55
Agosto	15,10	5,50	s/i	307,00	3,57	509,16	5,92	0,60
Septiembre	18,10	6,70	s/i	407,00	4,73	666,52	7,76	0,61
Octubre	20,90	8,20	s/i	510,00	5,93	830,72	9,66	0,61
Noviembre	24,40	10,60	s/i	593,00	6,90	955,92	11,12	0,62
Diciembre	26,20	12,00	s/i	638,00	7,42	1015,89	11,81	0,63

Cuadro 28: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Armerillo ENDESA-DMC.

Estación Armerillo ENDESA-DMC
 Latitud 35° 42' S
 Longitud 71° 05' W
 Altura 480 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	27,60	13,90	s/i	594,00	6,91	1027,35	11,94	0,58
Febrero	26,30	12,90	s/i	528,00	6,14	919,12	10,69	0,57
Marzo	23,80	11,10	s/i	407,00	4,73	708,65	8,24	0,57
Abril	20,00	8,90	s/i	276,00	3,21	559,76	6,51	0,49
Mayo	16,10	7,90	s/i	179,00	2,08	420,16	4,88	0,43
Junio	13,20	6,00	s/i	126,00	1,47	354,17	4,12	0,36
Julio	12,00	4,60	s/i	153,00	1,78	380,88	4,43	0,40
Agosto	14,60	5,60	s/i	231,00	2,69	492,09	5,72	0,47
Septiembre	16,30	6,80	s/i	331,00	3,85	653,11	7,59	0,51
Octubre	18,60	8,40	s/i	428,00	4,98	823,10	9,57	0,52
Noviembre	22,90	10,70	s/i	544,00	6,33	954,53	11,10	0,57
Diciembre	26,40	13,10	s/i	587,00	6,83	1018,00	11,84	0,58

Cuadro 29: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Desague Laguna Invernada ENDESA.

Estación Desague Laguna Invernada ENDESA
 Latitud 35° 44' S
 Longitud 70° 47' W
 Altura 1.325 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	24,10	12,20	s/i	608,00	7,07	1027,36	11,94	0,59
Febrero	24,20	12,30	s/i	543,00	6,31	918,98	10,69	0,59
Marzo	22,20	10,10	s/i	429,00	4,99	708,38	8,23	0,61
Abril	18,80	8,00	s/i	307,00	3,57	559,38	6,50	0,55
Mayo	12,70	4,70	s/i	191,00	2,22	419,73	4,88	0,45
Junio	8,60	1,60	s/i	140,00	1,63	353,73	4,12	0,40
Julio	7,10	0,70	s/i	168,00	1,95	380,44	4,42	0,44
Agosto	9,60	1,70	s/i	241,00	2,80	491,68	5,72	0,49
Septiembre	13,50	3,70	s/i	361,00	4,20	652,79	7,59	0,55
Octubre	16,00	5,30	s/i	453,00	5,27	822,91	9,57	0,55
Noviembre	19,40	7,90	s/i	567,00	6,94	954,50	11,09	0,63
Diciembre	21,70	10,90	s/i	580,00	6,74	1018,04	11,84	0,57

Cuadro 30: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Cauquenes INIA.

Estación Cauquenes INIA
 Latitud 35° 58' S
 Longitud 72° 20' W
 Altura 140 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	29,30	12,60	1,20	608,00	7,07	1027,39	11,94	0,59
Febrero	29,00	11,80	1,10	519,00	6,03	918,04	10,67	0,57
Marzo	26,60	10,90	1,70	389,00	4,52	706,51	8,21	0,55
Abril	22,10	7,70	2,70	270,00	3,14	556,69	6,48	0,48
Mayo	17,20	6,60	4,40	173,00	2,01	416,69	4,85	0,41
Junio	13,70	5,10	4,60	153,00	1,78	350,62	4,08	0,44
Julio	13,50	4,40	4,60	168,00	1,95	377,37	4,38	0,45
Agosto	15,00	4,80	3,60	239,00	2,78	488,85	5,69	0,49
Septiembre	17,50	5,30	3,10	336,00	3,91	650,54	7,57	0,52
Octubre	20,40	7,00	2,70	465,00	5,41	821,61	9,56	0,57
Noviembre	24,40	9,10	2,20	561,00	6,52	954,22	11,09	0,59
Diciembre	27,50	11,50	1,40	574,00	6,67	1018,35	11,84	0,56

Cuadro 31: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Santa Rosa De Cato.

Estación Santa Rosa De Cato
 Latitud 36° 32' S
 Longitud 71° 55' W
 Altura 217 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	28,70	8,80	1,60	650,00	7,56	1027,41	11,94	0,63
Febrero	28,30	8,40	1,90	581,00	6,76	915,71	10,65	0,63
Marzo	26,20	6,30	2,80	448,00	5,21	701,92	8,16	0,64
Abril	21,30	4,30	3,80	336,00	3,91	550,15	6,40	0,61
Mayo	16,00	3,50	5,30	180,00	2,09	409,30	4,76	0,44
Junio	13,40	2,50	4,90	148,00	1,72	343,06	3,99	0,43
Julio	13,10	2,80	5,60	157,00	1,83	369,91	4,30	0,42
Agosto	14,80	2,80	4,60	236,00	2,74	481,93	5,60	0,49
Septiembre	16,90	3,50	4,20	351,00	4,08	645,03	7,50	0,54
Octubre	20,30	4,70	3,50	478,00	5,56	818,39	9,51	0,58
Noviembre	23,50	6,90	2,90	604,00	7,02	953,49	11,08	0,63
Diciembre	26,40	8,70	2,00	668,00	7,77	1019,03	11,85	0,66

Cuadro 32: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Universidad De Concepción Bellavista.

Estación Universidad De Concepción Bellavista
 Latitud 36° 47' S
 Longitud 73° 07' W
 Altura 15 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	22,90	9,10	2,70	580,00	6,74	1027,39	11,94	0,56
Febrero	22,60	9,00	2,60	526,00	6,12	914,65	10,64	0,57
Marzo	21,10	7,90	3,80	414,00	4,81	699,88	8,14	0,59
Abril	18,70	6,80	4,30	291,00	3,38	547,24	6,36	0,53
Mayo	15,80	7,30	5,70	175,00	2,03	406,03	4,72	0,43
Junio	13,60	6,00	5,60	147,00	1,71	339,72	3,95	0,43
Julio	13,20	5,40	5,60	157,00	1,83	366,61	4,27	0,43
Agosto	13,90	5,10	5,80	227,00	2,64	478,87	5,57	0,47
Septiembre	15,20	5,40	4,70	326,00	3,79	642,58	7,48	0,51
Octubre	16,90	5,90	4,60	436,00	5,07	816,95	9,50	0,53
Noviembre	19,20	7,40	4,50	508,00	5,91	953,15	11,08	0,53
Diciembre	21,40	8,70	3,80	567,00	6,59	1019,32	11,85	0,56

Cuadro 33: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Polcura En Balseadero.

Estación Polcura En Balseadero
 Latitud 37° 19' S
 Longitud 71° 32' W
 Altura 740 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	23,50	8,60	s/i	536,00	6,23	1027,31	11,94	0,52
Febrero	23,20	8,00	s/i	464,00	5,40	912,34	10,60	0,51
Marzo	21,20	6,60	s/i	362,00	4,21	695,47	8,08	0,52
Abril	17,10	4,10	s/i	241,00	2,80	541,01	6,29	0,45
Mayo	13,20	2,60	s/i	132,00	1,53	399,05	4,64	0,33
Junio	9,40	0,90	s/i	103,00	1,20	332,60	3,87	0,31
Julio	9,80	0,70	s/i	119,00	1,38	359,57	4,19	0,33
Agosto	11,30	0,80	s/i	180,00	2,09	472,31	5,49	0,38
Septiembre	15,00	2,00	s/i	283,00	3,29	637,32	7,41	0,44
Octubre	15,60	3,40	s/i	373,00	4,34	813,82	9,47	0,46
Noviembre	19,20	5,80	s/i	480,00	5,58	952,37	11,07	0,50
Diciembre	22,10	8,10	s/i	521,00	6,06	1019,87	11,86	0,51

Cuadro 34: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Victoria Fach.

Estación Victoria Fach
 Latitud 38° 14' S
 Longitud 72° 21' W
 Altura 360 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	24,00	9,40	3,80	530,00	6,16	1027,01	11,94	0,52
Febrero	23,50	8,50	3,50	480,00	5,58	908,21	10,56	0,53
Marzo	21,40	6,50	4,00	369,00	4,29	687,76	8,00	0,54
Abril	17,50	5,30	5,10	240,00	2,79	530,21	6,16	0,45
Mayo	13,20	3,90	5,90	153,00	1,78	387,01	4,50	0,40
Junio	10,10	3,50	6,30	114,00	1,33	320,36	3,72	0,36
Julio	10,30	2,90	6,40	122,00	1,42	347,44	4,03	0,35
Agosto	11,20	2,70	6,20	170,00	1,98	460,96	5,36	0,37
Septiembre	13,80	3,50	5,40	274,00	3,19	628,15	7,30	0,44
Octubre	15,70	5,20	5,50	343,00	3,99	808,28	9,40	0,42
Noviembre	18,60	7,50	5,20	426,00	4,95	950,87	11,06	0,45
Diciembre	20,90	9,50	5,00	472,00	5,49	1020,68	11,87	0,46

Cuadro 35: Valores registrados en estación de monitoreo publicada por la Comisión Nacional de Riego y el Centro de Información de Recursos Naturales (1997) para la localidad de Desague Lago Chapo.

Estación Desague Lago Chapo
 Latitud 41° 26' S
 Longitud 72° 34' W
 Altura 240 m

Mes	Temperatura	Temperatura	Nubosidad (octavos)	Radiación Solar Global		Radiación Solar Extraterrestre		Coeficiente Transparencia
	Máxima (°C)	Mínima (°C)		Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	Superficie Horizontal (Ly/día)	kW/m ² /día	
Enero	18,80	7,90	s/i	427,00	4,97	1024,48	11,91	0,42
Febrero	18,40	7,40	s/i	396,00	4,60	892,18	10,37	0,44
Marzo	17,00	6,60	s/i	288,00	3,35	659,48	7,67	0,44
Abril	14,60	5,50	s/i	185,00	2,15	491,58	5,72	0,38
Mayo	11,90	4,70	s/i	98,00	1,14	344,63	4,01	0,28
Junio	9,90	3,30	s/i	74,00	0,86	277,64	3,23	0,27
Julio	9,40	3,00	s/i	86,00	1,00	304,96	3,55	0,28
Agosto	9,70	2,60	s/i	136,00	1,58	420,67	4,90	0,32
Septiembre	11,40	3,00	s/i	214,00	2,49	594,90	6,92	0,36
Octubre	13,10	3,90	s/i	298,00	3,47	787,44	9,15	0,38
Noviembre	15,40	5,70	s/i	386,00	4,49	944,16	10,98	0,41
Diciembre	17,30	7,10	s/i	450,00	5,23	1022,13	11,88	0,44

ANEXO III: ANÁLISIS ESTADÍSTICOS OBTENIDOS DE LA REGRESIÓN LINEAL
REALIZADA PARA OBTENER LOS COEFICIENTES A Y B UTILIZADOS EN EL CÁLCULO
DE LA NUBOSIDAD DE LA ATMÓSFERA

Cuadro 36: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Vallenar.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,791582				
R cuadrado ajustado	0,77074				
Error standard	2,81114				
Error medio absoluto	1,87076				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	300,141	1	300,141	37,98	0,0001
Residuos	79,0252	10	7,90252		
Total	379,167	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	69,1661	6,54097	10,5743	0,0000	
B	-3,88533	0,630445	-6,16283	0,0001	

Cuadro 37: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de La Serena.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,572563				
R cuadrado ajustado	0,529819				
Error standard	3,66315				
Error medio absoluto	2,78566				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	179,746	1	179,746	13,4	0,0044
Residuos	134,186	10	13,4186		
Total	313,932	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	86,8812	7,4486	11,6641	0,0000	
B	-3,00673	0,821521	-3,65995	0,0044	

Cuadro 38: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Coquimbo.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,663565				
R cuadrado ajustado	0,629921				
Error standard	2,7979				
Error medio absoluto	2,13531				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	154,4	1	154,4	19,72	0,0013
Residuos	78,2826	10	7,82826		
Total	232,682	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	82,3506	5,6768	14,5065	0,0000	
B	-2,78668	0,627476	-4,4411	0,0013	

Cuadro 39: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Vicuña.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,876444				
R cuadrado ajustado	0,864089				
Error standard	3,81276				
Error medio absoluto	2,63761				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	1031,19	1	1031,19	70,94	0,0000
Residuos	145,371	10	14,5371		
Total	1176,56	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	84,3239	7,6428	11,0331	0,0000	
B	-7,20168	0,855074	-8,42229	0,0000	

Cuadro 40: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Ovalle.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,512806				
R cuadrado ajustado	0,464086				
Error standard	10,6453				
Error medio absoluto	6,05146				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	1192,81	1	1192,81	10,53	0,0088
Residuos	1133,23	10	113,323		
Total	2326,04	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	102,011	19,9933	5,10225	0,0005	
B	-7,7455	2,3874	-3,24433	0,0088	

Cuadro 41: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Quillota.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,770106				
R cuadrado ajustado	0,747117				
Error standard	6,69256				
Error medio absoluto	5,04369				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	1500,4	1	1500,4	33,5	0,0022
Residuos	447,904	10	44,7904		
Total	1948,31	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	91,3492	9,20308	9,92595	0,0000	
B	-8,68697	1,50092	-5,78777	0,0002	

Cuadro 42: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Llay-Llay.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,847863				
R cuadrado ajustado	0,832649				
Error standard	5,66842				
Error medio absoluto	3,88978				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	1790,67	1	1790,67	55,73	0,0000
Residuos	321,31	10	32,131		
Total	2111,98	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	86,4211	7,86935	10,982	0,0000	
B	-9,49013	1,27124	-7,46527	0,0000	

Cuadro 43: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Los Andes.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,808352				
R cuadrado ajustado	0,789187				
Error standard	7,65522				
Error medio absoluto	6,15816				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	2471,79	1	2471,79	42,18	0,0001
Residuos	586,023	10	58,6023		
Total	3057,81	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	104,276	10,6108	9,82736	0,0000	
B	-11,1499	1,71681	-6,49454	0,0001	

Cuadro 44: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Valparaíso.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,873147				
R cuadrado ajustado	0,860462				
Error standard	3,58083				
Error medio absoluto	2,71169				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	882,584	1	882,584	68,83	0,0000
Residuos	128,224	10	12,8224		
Total	1010,81	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	89,5302	4,81421	18,5971	0,0000	
B	-6,66258	0,803061	-8,29648	0,0000	

Cuadro 45: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Santiago.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,801545				
R cuadrado ajustado	0,7817				
Error standard	7,96303				
Error medio absoluto	6,29341				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	2561,08	1	2561,08	40,39	0,0001
Residuos	634,099	10	63,4099		
Total	3195,18	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	102,717	9,95717	10,3159	0,0000	
B	-11,3495	1,78584	-6,35526	0,0001	

Cuadro 46: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Rancagua.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,878843				
R cuadrado ajustado	0,866727				
Error standard	6,36329				
Error medio absoluto	4,10299				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	2937,14	1	2937,14	72,54	0,0000
Residuos	404,914	10	40,4914		
Total	3342,06	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	97,9148	6,96112	14,066	0,0000	
B	-12,1542	1,42707	-8,51689	0,0000	

Cuadro 47: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de El Teniente.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,751977				
R cuadrado ajustado	0,727174				
Error standard	8,16116				
Error medio absoluto	6,53582				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	2019,37	1	2019,37	30,32	0,0003
Residuos	666,046	10	66,6046		
Total	2685,42	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	88,5389	9,05154	9,78164	0,0000	
B	-10,078	1,83028	-5,50625	0,0003	

Cuadro 48: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de San Fernando.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,824724				
R cuadrado ajustado	0,807197				
Error standard	8,79577				
Error medio absoluto	6,44827				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	3640,28	1	3640,28	47,05	0,0000
Residuos	773,655	10	77,3655		
Total	4413,93	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	103,845	8,8446	11,7411	0,0000	
B	-13,5311	1,9726	-6,85952	0,0000	

Cuadro 49: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Curicó.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,890741				
R cuadrado ajustado	0,879815				
Error standard	6,9927				
Error medio absoluto	4,81846				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	3986,41	1	3986,41	81,53	0,0000
Residuos	488,978	10	48,8978		
Total	4475,39	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	100,606	6,44805	15,6026	0,0000	
B	-14,1598	1,56823	-9,02914	0,0000	

Cuadro 50: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Molina.

Estadísticas de la regresión	
R cuadrado	0,86601
R cuadrado ajustado	0,852611
Error standard	6,22163
Error medio absoluto	4,27881

Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	2501,85	1	2501,85	64,63	0,0000
Residuos	387,087	10	38,7087		
Total	2888,93	11			

Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P
A	92,4661	5,59148	16,537	0,0000
B	-11,2175	1,3953	-8,03944	0,0000

Cuadro 51: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Talca.

Estadísticas de la regresión	
R cuadrado	0,927214
R cuadrado ajustado	0,919935
Error standard	5,6015
Error medio absoluto	3,99281

Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	3997,04	1	3997,04	127,39	0,0000
Residuos	313,768	10	31,3768		
Total	4310,81	11			

Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P
A	91,2412	4,61993	19,7494	0,0000
B	-14,1786	1,25623	-11,2866	0,0000

Cuadro 52: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Constitución.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,758382				
R cuadrado ajustado	0,73422				
Error standard	6,06704				
Error medio absoluto	4,54781				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	1155,35	1	1155,35	31,39	0,0002
Residuos	368,09	10	36,809		
Total	1523,44	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	71,3982	5,13158	13,9135	0,0000	
B	-7,62291	1,36064	-5,60246	0,0002	

Cuadro 53: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Punta Carranza.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,846946				
R cuadrado ajustado	0,831641				
Error standard	4,77375				
Error medio absoluto	3,41682				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	1261,05	1	1261,05	55,34	0,0000
Residuos	227,886	10	22,7886		
Total	1488,93	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	74,1029	3,76728	19,6701	0,0000	
B	-7,96398	1,07059	-7,43886	0,0000	

Cuadro 54: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Linares.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,863667				
R cuadrado ajustado	0,850034				
Error standard	7,6773				
Error medio absoluto	5,21069				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	3733,9	1	3733,9	63,35	0,0000
Residuos	589,41	10	58,941		
Total	4323,31	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	89,4753	5,66025	15,8076	0,0000	
B	-13,7039	1,72176	-7,95926	0,0000	

Cuadro 55: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Cauquenes.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,825042				
R cuadrado ajustado	0,807546				
Error standard	6,86642				
Error medio absoluto	5,61924				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	2223,32	1	2223,32	47,16	0,0000
Residuos	471,477	10	47,1477		
Total	2694,79	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	86,4469	4,87883	17,7188	0,0000	
B	-10,5746	1,53991	-6,86705	0,0000	

Cuadro 56: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Chillán.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,803148				
R cuadrado ajustado	0,783463				
Error standard	9,15287				
Error medio absoluto	6,74536				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	3417,98	1	3417,98	40,8	0,0001
Residuos	837,75	10	83,775		
Total	4255,73	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	76,2868	5,36552	14,218	0,0000	
B	-13,1114	2,05268	-6,38745	0,0001	

Cuadro 57: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Punta Tumbes.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,862227				
R cuadrado ajustado	0,84845				
Error standard	4,92827				
Error medio absoluto	3,57729				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	1520,01	1	1520,01	62,58	0,0000
Residuos	242,878	10	24,2878		
Total	1762,89	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	69,4042	2,86979	24,1844	0,0000	
B	-8,74356	1,10525	-7,91096	0,0000	

Cuadro 58: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Talcahuano.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,897622				
R cuadrado ajustado	0,887384				
Error standard	4,30442				
Error medio absoluto	3,06087				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	1624,49	1	1624,49	87,68	0,0000
Residuos	185,28	10	18,528		
Total	1809,77	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	64,1666	2,42315	26,4807	0,0000	
B	-9,03904	0,965337	-9,36361	0,0000	

Cuadro 59: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Concepción.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,793429				
R cuadrado ajustado	0,772772				
Error standard	6,37446				
Error medio absoluto	4,93695				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	1560,72	1	1560,72	38,41	0,0001
Residuos	406,337	10	40,6337		
Total	1967,06	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	70,5143	3,4544	20,4129	0,0000	
B	-8,85986	1,42958	-6,19754	0,0001	

Cuadro 60: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Los Ángeles.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,908582				
R cuadrado ajustado	0,89944				
Error standard	4,8675				
Error medio absoluto	2,94328				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	2354,74	1	2354,74	99,39	0,0000
Residuos	236,926	10	23,6926		
Total	2591,67	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	64,4568	2,08007	30,9878	0,0000	
B	-10,8827	1,09162	-9,96932	0,0000	

Cuadro 61: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Angol.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,872634				
R cuadrado ajustado	0,859898				
Error standard	5,69315				
Error medio absoluto	3,30779				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	2220,67	1	2220,67	68,51	0,0000
Residuos	324,119	10	32,4119		
Total	2544,79	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	63,2329	2,12495	29,7573	0,0000	
B	-10,5683	1,27678	-8,27732	0,0000	

Cuadro 62: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Contulmo.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,814967				
R cuadrado ajustado	0,796464				
Error standard	5,81335				
Error medio absoluto	4,09699				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	1488,48	1	1488,48	44,04	0,0001
Residuos	337,95	10	33,795		
Total	1826,43	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	58,0404	2,00746	28,9124	0,0000	
B	-8,6524	1,30374	-6,6366	0,0001	

Cuadro 63: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Traiguén.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,884011				
R cuadrado ajustado	0,872412				
Error standard	5,37298				
Error medio absoluto	3,66471				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	2200,24	1	2200,24	76,21	0,0000
Residuos	288,689	10	28,8689		
Total	2488,93	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	62,3039	1,72422	36,1346	0,0000	
B	-10,5196	1,20498	-8,73012	0,0000	

Cuadro 64: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Lonquimay.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,844882				
R cuadrado ajustado	0,82937				
Error standard	6,63117				
Error medio absoluto	4,97705				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	2395,04	1	2395,04	54,47	0,0000
Residuos	439,724	10	43,9724		
Total	2834,77	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	63,3216	2,02542	31,2635	0,0000	
B	-10,9754	1,48715	-7,38018	0,0000	

Cuadro 65: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Temuco.

Estadísticas de la regresión					
R cuadrado	0,839371				
R cuadrado ajustado	0,823308				
Error standard	4,40251				
Error medio absoluto	2,97516				
Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	1012,82	1	1012,82	52,26	0,0000
Residuos	193,821	10	19,3821		
Total	1206,64	11			
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P	
A	64,9547	1,27687	50,8701	0,0000	
B	-7,13724	0,987336	-7,22879	0,0000	

Cuadro 66: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Puerto Domínguez.

Estadísticas de la regresión	
R cuadrado	0,865428
R cuadrado ajustado	0,851971
Error standard	4,00871
Error medio absoluto	2,75588

Análisis de varianza					
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	Valor F	Probabilidad P
Regresión	1033,44	1	1033,44	64,31	0,0000
Residuos	160,698	10	16,0698		
Total	1194,14	11			

Parámetros	Estimaciones	Error standard	Estadístico t	Probabilidad P
A	59,5073	1,15743	51,4131	0,0000
B	-7,20954	0,89902	-8,01934	0,0000

ANEXO IV: ANÁLISIS ESTADÍSTICOS OBTENIDOS DE LA REGRESIÓN LINEAL
REALIZADA PARA OBTENER EL COEFICIENTE A UTILIZADO EN EL CÁLCULO DEL
COEFICIENTE DE TRANSPARENCIA DE LA ATMÓSFERA

Cuadro 67: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Faro Punta Angeles Valparaíso.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado		0,612496		
R cuadrado ajustado		0,612496		
Error standard		0,038097		
Error medio absoluto		0,0316001		
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	2,45523	1	2,45523	
Residuos	0,0159652	11	0,00145138	
Total	2,4712	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,158688	0,00385823	0,150196	0,16718

Cuadro 68: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Lliu-Lliu.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado		0,891628		
R cuadrado ajustado		0,891628		
Error standard		0,0185405		
Error medio absoluto		0,0146386		
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	3,10152	1	3,10152	
Residuos	0,00378127	11	0,000343752	
Total	3,1053	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,141002	0,00148443	0,137734	0,144269

Cuadro 69: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Aeropuerto Arturo Merino Benítez Ex Pudahuel.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado		0,614667		
R cuadrado ajustado		0,614667		
Error standard		0,0630897		
Error medio absoluto		0,0533665		
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	4,07192	1	4,07192	
Residuos	0,0437834	11	0,00398031	
Total	4,1157	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,146858	0,00459153	0,136752	0,156964

Cuadro 70: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Quinta Normal.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado		0,769127		
R cuadrado ajustado		0,769127		
Error standard		0,0398052		
Error medio absoluto		0,0338883		
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	3,25107	1	3,25107	
Residuos	0,017429	11	0,00158445	
Total	3,2685	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,139359	0,00307654	0,132588	0,14613

Cuadro 71: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Base Aérea El Bosque.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado				0
R cuadrado ajustado				0
Error standard				0,0393529
Error medio absoluto				0,0334817
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	4,21006	1	4,21006	
Residuos	0,0170352	11	0,00154865	
Total	4,2271	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,159014	0,00304979	0,152302	0,165727

Cuadro 72: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de La Platina INIA.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado				0,796789
R cuadrado ajustado				0,796789
Error standard				0,0310809
Error medio absoluto				0,0252034
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	3,29687	1	3,29687	
Residuos	0,0106262	11	0,00096602	
Total	3,3075	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,135828	0,00232504	0,13071	0,140945

Cuadro 73: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Guayacán San José De Maipo.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado		0,433594		
R cuadrado ajustado		0,433594		
Error standard		0,0238982		
Error medio absoluto		0,0185852		
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	4,31282	1	4,31282	
Residuos	0,00628239	11	0,000571126	
Total	4,3191	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,153223	0,00176324	0,149343	0,157104

Cuadro 74: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Embalse El Yeso DGA.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado		0		
R cuadrado ajustado		0		
Error standard		0,0487386		
Error medio absoluto		0,0435088		
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	3,62507	1	3,62507	
Residuos	0,02613	11	0,00237545	
Total	3,6512	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,179667	0,00459921	0,169544	0,189789

Cuadro 75: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Melipilla ENDESA.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado	0,713135			
R cuadrado ajustado	0,713135			
Error standard	0,0430982			
Error medio absoluto	0,0342806			
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	2,84447	1	2,84447	
Residuos	0,020432	11	0,00185745	
Total	2,8649	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,131139	0,00335113	0,123763	0,138515

Cuadro 76: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Antena Radio Quelentaro.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado	0,921899			
R cuadrado ajustado	0,921899			
Error standard	0,0173694			
Error medio absoluto	0,0133896			
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	3,27358	1	3,27358	
Residuos	0,00331866	11	0,000301696	
Total	3,2769	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,157839	0,00151526	0,154503	0,161174

Cuadro 77: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Puente Arqueado ENDESA.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado	0,384303			
R cuadrado ajustado	0,384303			
Error standard	0,0350047			
Error medio absoluto	0,0283115			
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	4,41282	1	4,41282	
Residuos	0,0134786	11	0,00122533	
Total	4,4263	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,171805	0,0028629	0,165504	0,178107

Cuadro 78: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Armerillo ENDESA-DMC.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado	0,881885			
R cuadrado ajustado	0,881885			
Error standard	0,0260693			
Error medio absoluto	0,0198043			
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	3,10602	1	3,10602	
Residuos	0,00747569	11	0,000679608	
Total	3,1135	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,155835	0,00230512	0,150762	0,160909

Cuadro 79: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Desague Laguna Invernada ENDESA.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado	0,87708			
R cuadrado ajustado	0,87708			
Error standard	0,0256986			
Error medio absoluto	0,0176712			
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	3,48654	1	3,48654	
Residuos	0,00726459	11	0,000660417	
Total	3,4938	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,171312	0,00235777	0,166123	0,176501

Cuadro 80: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Cauquenes INIA.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado	0,689538			
R cuadrado ajustado	0,689538			
Error standard	0,0349045			
Error medio absoluto	0,0288697			
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	3,2538	1	3,2538	
Residuos	0,0134016	11	0,00121833	
Total	3,2672	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,142873	0,00276463	0,136788	0,148958

Cuadro 81: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Santa Rosa De Cato.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado	0,841432			
R cuadrado ajustado	0,841432			
Error standard	0,0360524			
Error medio absoluto	0,0272545			
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	3,8167	1	3,8167	
Residuos	0,0142975	11	0,00129978	
Total	3,831	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,143363	0,00264563	0,13754	0,149186

Cuadro 82: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Universidad De Concepción Bellavista.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado	0,935259			
R cuadrado ajustado	0,935259			
Error standard	0,0147502			
Error medio absoluto	0,0115177			
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	3,17621	1	3,17621	
Residuos	0,00239325	11	0,000217568	
Total	3,1786	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,156009	0,0012912	0,153167	0,15885

Cuadro 83: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Polcura En Balceadero.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado	0,725287			
R cuadrado ajustado	0,725287			
Error standard	0,0422174			
Error medio absoluto	0,0352781			
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	2,35739	1	2,35739	
Residuos	0,0196054	11	0,00178231	
Total	2,377	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,125783	0,00345858	0,118171	0,133395

Cuadro 84: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Victoria FACH.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado	0,949443			
R cuadrado ajustado	0,949443			
Error standard	0,0146178			
Error medio absoluto	0,0126947			
Análisis de varianza				
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados	
Regresión	2,37615	1	2,37615	
Residuos	0,00235047	11	0,000213679	
Total	2,3785	12		
Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,13427	0,00127328	0,131467	0,137072

Cuadro 85: Tabla con los respectivos análisis estadísticos desarrollados para la regresión no lineal correspondiente a la estación de monitoreo ubicada en la localidad de Desague Lago Chapo.

Estadísticas de la regresión				
R cuadrado			0,762801	
R cuadrado ajustado			0,762801	
Error standard			0,0320939	
Error medio absoluto			0,0242749	

Análisis de varianza			
	Suma cuadrados	Grados de libertad	Promedio cuadrados
Regresión	1,66447	1	1,66447
Residuos	0,0113302	11	0,00103002
Total	1,6758	12	

Parámetros	Estimaciones	Error standard	Intervalo de confianza inferior 95%	Intervalo de confianza superior 95%
A	0,125192	0,0031143	0,118337	0,132046

ANEXO V: MODELO DE ESTIMACIÓN GRÁFICA DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE
LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL MEDIA MENSUAL SOBRE LA SUPERFICIE
TERRESTRE DE LA ZONA CENTRAL DE CHILE

A continuación se señala el modelo de simulación matemático desarrollado en formato BAS mediante el uso de las herramientas de programación que ofrece el programa Qbasic, capaz de representar la distribución espacial de la irradiación solar global media mensual sobre toda la superficie terrestre perteneciente a la zona central de Chile a través del diseño de imágenes cartográficas.

Este modelo contiene la rutina PINSOL.BAS original publicada por la United States Department of Agriculture (2003), cuyas modificaciones que incluye este modelo corresponden a las rutinas de simulación para estimar los valores medios mensuales de la nubosidad atmosférica basada en el Lugar de presión máxima en Chile, el coeficiente de transparencia de la atmósfera en función de la nubosidad, el espesor atmosférico, la transmisividad de la atmósfera y la irradiación solar global sobre la superficie terrestre en función de la radiación solar directa y difusa.

' Código del modelo de radiación solar

```

DECLARE FUNCTION DecSol! (x!)
DECLARE FUNCTION DiSol! (x!)
DECLARE FUNCTION Acos! (x!)
DECLARE FUNCTION Asin! (x!)
DECLARE SUB INTERPOL (meanY(), DayVal())

DIM MediaMensual(20)
DIM MediaDiaria(20)
DIM SHARED DayVal(400)
DIM m(20)
DIM FM(20)
DIM mes(20)
DIM MinVal(12)
DIM MaxVal(12)
DIM Doc$(30)
DIM IMG$(20)

```

DIM ABR\$(20)

DIM TIT\$(20)

DIM ValRa(20)

DIM LPM(20)

DIM PEND AS SINGLE

DIM EXPO AS SINGLE

DIM I3 AS STRING * 1

' Datos de entrada al modelo de radiación solar global

PATH\$ = "c:\tesis\idri\"

IMG\$(1) = "pen"

IMG\$(2) = "expo"

IMG\$(3) = "dem"

IMG\$(4) = "mas"

IMG\$(5) = "Ene"

IMG\$(6) = "Feb"

IMG\$(7) = "Mar"

IMG\$(8) = "Abr"

IMG\$(9) = "May"

IMG\$(10) = "Jun"

IMG\$(11) = "Jul"

IMG\$(12) = "Ago"

IMG\$(13) = "Sep"

IMG\$(14) = "Oct"

IMG\$(15) = "Nov"

IMG\$(16) = "Dic"

TIT\$(1) = "Radiación Solar Global Enero"

TIT\$(2) = "Radiación Solar Global Febrero"

TIT\$(3) = "Radiación Solar Global Marzo"
TIT\$(4) = "Radiación Solar Global Abril"
TIT\$(5) = "Radiación Solar Global Mayo"
TIT\$(6) = "Radiación Solar Global Junio"
TIT\$(7) = "Radiación Solar Global Julio"
TIT\$(8) = "Radiación Solar Global Agosto"
TIT\$(9) = "Radiación Solar Global Septiembre"
TIT\$(10) = "Radiación Solar Global Octubre"
TIT\$(11) = "Radiación Solar Global Noviembre"
TIT\$(12) = "Radiación Solar Global Diciembre"

' Latitud del lugar de presión máxima en Chile (LPM)

LPM(1) = 39.9
LPM(2) = 40.6
LPM(3) = 40.3
LPM(4) = 39
LPM(5) = 37
LPM(6) = 37.3
LPM(7) = 36.9
LPM(8) = 37.7
LPM(9) = 38.6
LPM(10) = 39.4
LPM(11) = 39.7
LPM(12) = 40.1

' Constante Pi

CONST pi = 3.141592654#

' Coeficientes del programa

CONST cvde = 57.29578

CONST Cvr = pi / 180

CONST w = .0043633231#

' Días de cada mes

m(1) = 31: m(2) = 28: m(3) = 31: m(4) = 30: m(5) = 31: m(6) = 30

m(7) = 31: m(8) = 31: m(9) = 30: m(10) = 31: m(11) = 30: m(12) = 31: m(13) = 31

' Fin de cada mes

FM(1) = 31: FM(2) = 60: FM(3) = 90: FM(4) = 120: FM(5) = 151: FM(6) = 181

FM(7) = 212: FM(8) = 243: FM(9) = 273: FM(10) = 304: FM(11) = 334: FM(12) = 365: FM(13) =
367

CLS

' Lee el documento de la máscara

Doc\$ = PATH\$ + IMG\$(4) + ".rdc"

OPEN Doc\$ FOR INPUT AS #1

INPUT #1, Doc\$(1)	'File format
INPUT #1, Doc\$(2)	'File title
INPUT #1, Doc\$(3)	'Data type
INPUT #1, Doc\$(4)	'File type
INPUT #1, Doc\$(5)	'Columns
INPUT #1, Doc\$(6)	'Rows
INPUT #1, Doc\$(7)	'Ref System
INPUT #1, Doc\$(8)	'Ref Units
INPUT #1, Doc\$(9)	'Unit Dist
INPUT #1, Doc\$(10)	'Min X
INPUT #1, Doc\$(11)	'Max X
INPUT #1, Doc\$(12)	'Min Y
INPUT #1, Doc\$(13)	'Max Y
INPUT #1, Doc\$(14)	'Pos'n Error

```

INPUT #1, Doc$(15) 'Resolution
INPUT #1, Doc$(16) 'Min. Value
INPUT #1, Doc$(17) 'Max. Value
INPUT #1, Doc$(18) 'Display Min.
INPUT #1, Doc$(19) 'Display Max.
INPUT #1, Doc$(20) 'Value Units
INPUT #1, Doc$(21) 'Value Error
INPUT #1, Doc$(22) 'Flag Value
INPUT #1, Doc$(23) 'Flag def'n
INPUT #1, Doc$(24) 'Legends Cats.
CLOSE #1

' Número de Columnas
Col = VAL(MID$(Doc$(5), 15, LEN(Doc$(5)) - 14))

' Número de Filas
Fil = VAL(MID$(Doc$(6), 15, LEN(Doc$(6)) - 14))

' Tipo de archivo
ARCH$ = MID$(Doc$(4), 15, LEN(Doc$(4)) - 14)

' Tipo de variable
VARI$ = MID$(Doc$(3), 15, LEN(Doc$(3)) - 14)

' Mínimo valor
MinY = VAL(MID$(Doc$(12), 15, LEN(Doc$(12)) - 14))

' Máximo valor
MaxY = VAL(MID$(Doc$(13), 15, LEN(Doc$(13)) - 14))

' Mínimo Valor

```

```
MinX = VAL(MID$(Doc$(10), 15, LEN(Doc$(10)) - 14))
```

```
' Máximo valor
```

```
MaxX = VAL(MID$(Doc$(11), 15, LEN(Doc$(11)) - 14))
```

```
' Largo del archivo
```

```
la = Fil * Col
```

```
' Abre los archivos ingresados por el usuario
```

```
' ON ERROR GOTO ABRIR
```

```
FOR i = 1 TO 4
```

```
  ABR$(i) = PATH$ + IMG$(i) + ".rst"
```

```
  OPEN ABR$(i) FOR BINARY AS #i
```

```
NEXT i
```

```
' Barra Proceso
```

```
COLOR 4: LOCATE 22, 3: PRINT "Porcentaje Cálculo: "
```

```
COLOR 7, 0
```

```
LOCATE 22, 22: PRINT "++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++++"
```

```
LOCATE 23, 22: PRINT "  10  20  30  40  50  60  70  80  90  100"
```

```
COLOR 14, 0
```

```
FOR i = 1 TO 12
```

```
  MinVal(i) = 1E+10
```

```
  MaxVal(i) = -1E+10
```

```
NEXT i
```

```
ProCont = 0
```

```
Regis = 2
```

```
' Paso en latitud
```

```
PasoY = (MaxY - MinY) / Fil
```

```

' Paso en longitud
PasoX = (MaxX - MinX) / Col
FOR i = 1 TO Fil
Por = i * 100 / Fil
  PL = CINT(Por)
  LOCATE 20, 22: PRINT "Porcentaje: "; Por; " %      "
  IF PL >= Regis THEN LOCATE 22, 22 + ProCont: PRINT "Ú"
  IF PL >= Regis THEN ProCont = ProCont + 1
  IF PL >= Regis THEN Regis = Regis + 2

' Latitud del pixel
LAT = ((MaxY - PasoY / 2) - (i - 1) * PasoY)

' Transforma la latitud en grados a radianes
LatRad = LAT * (pi / 180)

' Calcula seno, coseno y tangente de la latitud
sinlat = SIN(LatRad): coslat = COS(LatRad): Tanlat = TAN(LatRad)

' Cálculo en filas y columnas
FOR k = 1 TO Col

  ' Calculo de la longitud del pixel
  LON = ((MinX + PasoX / 2) + (k - 1) * PasoX)

  ' Transforma la latitud en grados a radianes
  Lonrad = LON * (pi / 180)

' Ingreso de datos de exposición y pendiente desde imagenes en formato IDRISI 32

' Posición del Byte para imagen real

```

```
u = 4 * (((i - 1) * Col) + (k - 1)) + 1
```

```
' Posición del Byte para imagen byte
```

```
v = 1 * (((i - 1) * Col) + (k - 1)) + 1
```

```
' Lee desde los archivos
```

```
GET #1, u, PEND 'Pendiente
```

```
GET #2, u, EXPO 'Exposición
```

```
GET #3, u, ALT 'Altitud
```

```
GET #4, v, I3 'Mascara
```

```
MASC = ASC(I3)
```

```
IF MASC = 1 THEN
```

```
' Asigna valor de pendiente a Slp en grados
```

```
Slp = PEND
```

```
' Asigna valor de exposición al Sol a asp en grados respecto del norte
```

```
asp = EXPO
```

```
' Inicializa mes
```

```
mes = 1
```

```
' Inicializa radiación solar global
```

```
FOR n = 1 TO 12
```

```
ValRa(n) = 0
```

```
NEXT n
```

```
' Cálculo de la nubosidad
```

```
a = 426.993 - 1.07333 * ABS(LAT) ^ 2 - .300196 * ABS(LON) ^ 2 + 1.00402 *  
ABS(LAT) * ABS(LON)
```

$$b = -77.3449 + .186145 * \text{ABS}(\text{LAT})^2 + .0615251\# * \text{ABS}(\text{LON})^2 - .190474 * \text{ABS}(\text{LAT}) * \text{ABS}(\text{LON})$$

' Variable media mensual de la nubosidad

FOR n = 1 TO 12

$$\text{MediaMensual}(n) = (a + b * (\text{LPM}(n) - \text{LAT})) / 100$$

IF MediaMensual(n) > .8 THEN MediaMensual(n) = .8

IF MediaMensual(n) < 0 THEN MediaMensual(n) = 0

NEXT n

$$\text{MediaMensual}(13) = \text{MediaMensual}(1)$$

FOR n = 1 TO 12

$$\text{MediaDiaria}(n) = \text{MediaMensual}(n)$$

NEXT n

$$\text{MediaDiaria}(13) = \text{MediaMensual}(1)$$

' Valores medios diarios de la nubosidad

INTERPOL MediaDiaria(), DayVal()

' Comienza el cálculo diario

FOR diano = 1 TO 366

' Transforma el día juliano a día en radianes

$$\text{DiaRad} = 2 * \pi * (\text{diano} - 1) / 365$$

' Distancia Tierra - Sol en UA

$$\text{Eo} = \text{DiSol}(\text{DiaRad})$$

' Declinación solar

$$\text{Decl} = \text{DecSol}(\text{DiaRad})$$

' Calcula seno, coseno y tangente de la declinación solar

```

sindecl = SIN(Decl): cosdecl = COS(Decl): TanDecl = TAN(Decl)

' Calcula hora de salida y puesta del Sol, wsr y wss

' Calcula variable ws
Ws = Acos(-Tanlat * TanDecl)

' Calcula radiación solar usando rutina PINSOL.BAS

' Insolación potencial como función del tiempo
aip = 2 + .07 * COS(diano * pi / 182.621)
sinlat = SIN(LatRad)
coslat = COS(LatRad)
sindecl = SIN(Decl)
SinAsp = SIN(asp * Cvr)
SinSlp = SIN(Slp * Cvr)
cosdecl = COS(Decl)
CosAsp = COS(asp * Cvr)
CosSlp = COS(Slp * Cvr)

' Separa el caso particular de los polos
IF ABS(LAT) <= 89.99999 THEN
    tanl = TAN(LatRad)
ELSE
    tanl = 6000000!
    IF LAT < 0 THEN tanl = -tanl
END IF
TanDecl = TAN(Decl)

' Determina ángulo horario del Sol para salida y puesta del Sol con pendiente cero
tltd = -tanl * TanDecl

```

```
IF ABS(tltd) <= 1 THEN
```

```
  ' Caso de algo de día y algo de oscuridad
```

```
  Wtime = Acos(-tanl * TanDecl)
```

```
ELSEIF tltd > -1 THEN
```

```
  ' Caso de oscuridad perpetua
```

```
  Wtime = 0
```

```
ELSE
```

```
  ' Caso de Sol perpetuo
```

```
  Wtime = pi
```

```
END IF
```

```
tiempo = Wtime / w
```

```
' Determina los valores en el caso de pendiente cero
```

```
wt1 = -Wtime
```

```
wt2 = Wtime
```

```
' Salida del Sol
```

```
srise = wt1 / w
```

```
' Puesta del Sol
```

```
sset = wt2 / w
```

```
aish = ((wt2 - wt1) * sinlat * sindecl + coslat * cosdecl * (SIN(wt2) - SIN(wt1))) / w
```

```
aiqh = aip * aish
```

```
IF tiempo > 0 THEN
```

```
  rih = 50 * aish / tiempo
```

```
  rsh = 1
```

```
ELSE
```

```
  rih = 0
```

```

    rsh = 0
  END IF
  IF Slope = 0 THEN
    aiq = aiqh
    ri = rih
  ELSE

    ' Calcula el argumento para determinar cambio en longitud (ALPHA) debido a la
    superficie con pendiente
    AR = SinAsp * SinSlp / (CosSlp * coslat - CosAsp * SinSlp * sinlat)
    alpha = ATN(AR)
    a = SinSlp * CosAsp * coslat + CosSlp * sinlat
    IF ABS(a) < 99999! THEN
      TanEhl = a / SQR(1 - a * a)
    ELSE
      TanEhl = a * 225
    END IF
    Ehl = ATN(TanEhl)
    SinEhl = SIN(Ehl)
    CosEhl = COS(Ehl)
    tehlt = -TanEhl * TanDecl
    IF ABS(tehlt) <= 1 THEN

      ' Caso de algo de día y algo de oscuridad
      Wt = Acos(-TanEhl * TanDecl)
    ELSEIF tehlt > -1 THEN

      ' Caso de oscuridad perpetua
      Wt = 0
    ELSE

```

```

' Caso de Sol perpetuo
  Wt = pi
END IF
wt1 = -Wt - alpha
wt2 = Wt - alpha

' Chequea con valores para una superficie horizontal
IF Wtime < ABS(wt1) THEN wt1 = -Wtime
IF Wtime < ABS(wt2) THEN wt2 = Wtime
srise = wt1 / w: sset = wt2 / w

' Calcula la insolación potencial para el sitio actual
ais = ((wt2 - wt1) * SinEhl * sindecl + CosEhl * cosdecl * (SIN(wt2 + alpha) - SIN(wt1
+ alpha))) / w
aiq = aip * ais
IF tiempo > 0 THEN
  ri = 50 * ais / tiempo
  rsh = aiq / aiqh
ELSE
  ri = 0
  rsh = 0
END IF
END IF

' Radiación solar potencial en MJ / m2 / día
ra = Eo * aiq * 4.184 / 100

' Salida del Sol
wsr = srise

' Puesta del Sol

```

wss = sset

' Duración del día

$n = (2 / 15) * Wtime * (180 / \pi)$

' Radiación solar sobre una superficie horizontal

$Rash = Eo * a_{iqh} * 4.184 / 100$

If Slope = 0 Then ra = rash

' Fin de la rutina PINSOL.BAS

' Calcula el coeficiente de transparencia de la atmósfera

$CoefTransp = .626641 - .00689277\# * DayVal(diano) ^ 2$

' Espesor de la atmósfera

$PPo = EXP(-.000118 * ALT)$

$coshs = -(sinlat * sindecl / (coslat * cosdecl))$

$sinhs = SQR(1 - coshs * coshs)$

$hs = \pi / 2 - ATN(coshs / sinhs)$

$costeta = hs * sinlat * sindecl + coslat * cosdecl * sinhs$

$m = PPo / costeta$

' Transmisividad de la atmósfera

$Trans = CoefTransp ^ m$

' Calcula la radiación solar difusa

$RaDif = .0741 * ra * (1 - Trans) * (1 + CosSlp)$

' Calcula la radiacion solar directa

$RaDirec = .741 * ra * Trans$

```

' Calcula la radiación solar global
rsgest = RaDirec + RaDif

IF EXPO = -1 THEN
  ra = Rash * CoefTransp
ELSE
  ra = rsgest
END IF

' Cálculo para valores medios mensuales
IF diano <= FM(mes) THEN
  SumRad = SumRad + ra
ELSE
  ValRa(mes) = SumRad / m(mes)
  SumRad = 0
  mes = mes + 1
END IF
NEXT diano
mes = 1
ELSE
  FOR n = 1 TO 12
    ValRa(n) = 0
  NEXT n
END IF

' Aquí se graban los valores de radiación solar global en las imágenes
FOR mes = 1 TO 12
  ABR$(mes + 4) = PATH$ + IMG$(mes + 4) + ".rst"
  OPEN ABR$(mes + 4) FOR BINARY AS #5

  ' Graba valor de radiación solar global

```

```

    PUT #5, u, ValRa(mes)

    ' Encuentra valores mínimos y máximos
    IF ValRa(mes) < MinVal(mes) THEN MinVal(mes) = ValRa(mes)
    IF ValRa(mes) > MaxVal(mes) THEN MaxVal(mes) = ValRa(mes)
    CLOSE #5
NEXT mes

    ' Borra la variable Ra a nivel mensual
    FOR n = 1 TO 12
        ValRa(n) = 0
    NEXT n
NEXT k
NEXT i
CLOSE

FOR i = 1 TO 12
    ABR$ = PATH$ + IMG$(i + 4) + ".rdc"
    OPEN ABR$ FOR OUTPUT AS #5
    PRINT #5, Doc$(1) 'File format
    PRINT #5, "file title: "; TIT$(i)
    PRINT #5, "data type: real"
    PRINT #5, "file type: binary"
    PRINT #5, Doc$(5) 'Columns
    PRINT #5, Doc$(6) 'Rows
    PRINT #5, Doc$(7) 'Ref System
    PRINT #5, Doc$(8) 'Ref Units
    PRINT #5, Doc$(9) 'Unit Dist
    PRINT #5, Doc$(10) 'Min X
    PRINT #5, Doc$(11) 'Max X
    PRINT #5, Doc$(12) 'Min Y

```

```

PRINT #5, Doc$(13) 'Max Y
PRINT #5, Doc$(14) 'Pos'n Error
PRINT #5, Doc$(15) 'Resolution
PRINT #5, "Min. Value: "; LTRIM$(RTRIM$(STR$(MinVal(i))))
PRINT #5, "Max. Value: "; LTRIM$(RTRIM$(STR$(MaxVal(i))))
PRINT #5, "Display Min.: "; LTRIM$(RTRIM$(STR$(MinVal(i))))
PRINT #5, "Display Max.: "; LTRIM$(RTRIM$(STR$(MaxVal(i))))
PRINT #5, Doc$(20) 'Value Units
PRINT #5, Doc$(21) 'Value Error
PRINT #5, Doc$(22) 'Flag Value
PRINT #5, Doc$(23) 'Flag def'n
PRINT #5, Doc$(24) 'Legends Cats.
CLOSE #5
NEXT i

CHAO:
COLOR 7, 0
CLOSE
END

```

' Calcula el arcocoseno de un valor

```

FUNCTION Acos (x)
  Acos = pi / 2 - Asin(x)
END FUNCTION

```

```

FUNCTION Asin (x)
  IF x < -1 THEN
    Asin = 0
  ELSEIF x = -1 THEN
    Asin = 2 * pi
  
```

```

ELSEIF x = 1 THEN
  Asin = pi / 2
ELSE
  Asin = ATN(x / SQR(1 - x * x)) '(normal)
END IF
END FUNCTION

```

' Calcula la declinación solar

```

FUNCTION DecSol (x)
A2 = .006918
B2 = -.399912 * COS(x) + .070257 * SIN(x)
C2 = -.006758 * COS(2 * x) + .000907 * SIN(2 * x)
D2 = -.002697 * COS(3 * x) + .00148 * SIN(3 * x)
DecSol = A2 + B2 + C2 + D2
END FUNCTION

```

' Calcula distancia Tierra - Sol en unidades astronómicas

```

FUNCTION DiSol (x)
A1 = 1.00011
B1 = .034221 * COS(x) + .00128 * SIN(x)
C1 = .000719 * COS(2 * x) + .000077 * SIN(2 * x)
DiSol = A1 + B1 + C1
END FUNCTION

```

' Realiza una interpolación

```

SUB INTERPOL (meanY(), DayVal())

```

```

DIM monthends(29) AS INTEGER

```

```

DIM a(13) AS SINGLE, b(13) AS SINGLE, c(13) AS SINGLE
DIM aa(12) AS SINGLE, bb(12) AS SINGLE, cc(12) AS SINGLE
DIM d(13) AS SINGLE, h(13) AS SINGLE
DIM i AS INTEGER, j AS INTEGER
DIM t AS SINGLE
DIM y(13) AS SINGLE
'DIM meanY(13) AS SINGLE

```

```
d(1) = meanY(1) - meanY(12)
```

```
h(0) = 30
```

```
monthends(0) = 0: monthends(1) = 31: monthends(2) = 59
```

```
monthends(3) = 90: monthends(4) = 120: monthends(5) = 151
```

```
monthends(6) = 181: monthends(7) = 212: monthends(8) = 243
```

```
monthends(9) = 273: monthends(10) = 304: monthends(11) = 334
```

```
monthends(12) = 365
```

```
FOR i = 1 TO 12
```

```
  d(i + 1) = meanY(i + 1) - meanY(i)
```

```
  h(i) = monthends(i) - monthends(i - 1) - 1
```

```
  aa(i) = h(i - 1) / 6
```

```
  bb(i) = (h(i - 1) + h(i)) / 3
```

```
  cc(i) = h(i) / 6
```

```
NEXT i
```

```
FOR i = 1 TO 11
```

```
  cc(i) = cc(i) / bb(i)
```

```
  d(i) = d(i) / bb(i)
```

```
  bb(i + 1) = bb(i + 1) - aa(i + 1) * cc(i)
```

```
  d(i + 1) = d(i + 1) - aa(i + 1) * d(i)
```

```
NEXT i
```

$b(12) = d(12) / bb(12)$

FOR i = 11 TO 1 STEP -1

$b(i) = d(i) - cc(i) * b(i + 1)$

NEXT i

FOR i = 1 TO 12

$a(i) = (b(i + 1) - b(i)) / (2 * h(i))$

$c(i) = \text{mean}Y(i) - (b(i + 1) + 2 * b(i)) * h(i) / 6$

NEXT i

j = 0

FOR i = 1 TO 365

 IF monthends(j) < i THEN j = j + 1

 t = i - monthends(j - 1) - 1

 DayVal(i) = c(j) + b(j) * t + a(j) * t * t

NEXT i

DayVal(366) = DayVal(1)

END SUB