

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

Prof. Patrocinante: Álvaro Suazo Schwencke

METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN DE PERIODOS Y TRAMOS DE VÍA CON DESLUMBRAMIENTO SOLAR

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener
el Título de Ingeniero Civil

MANUEL ALEJANDRO ORTIZ PACHECO

Concepción, Septiembre 2015.

ÍNDICE.

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
I: INTRODUCCIÓN.	3
1.1. Justificación.	5
1.2. Objetivo General.....	5
1.3. Objetivos Específicos.	5
II: FACTORES DE DESLUMBRAMIENTO.	6
2.1. Posición del Sol.	6
2.1.1. <i>Cálculo Día Juliano.</i>	6
2.1.2. <i>Cálculo de Coordenadas de la Eclíptica Solar.</i>	7
2.1.3. <i>Convertir Coordenadas Eclípticas a Celestes.</i>	8
2.1.4. <i>Convertir Coordenadas Celestes a Horizontales.</i>	8
2.2. Dirección de la línea de visión.	11
2.3. Cono de deslumbramiento.	12
2.4. Configuración de terreno.	15
III: METODOLOGÍA PARA IDENTIFICAR PERIODOS Y TRAMOS CON DESLUMBRAMIENTO SOLAR.....	16
3.1. Posiciones del sol.	17
3.2. Línea de visión y cono de deslumbramiento.	19
3.3. Perfil de terreno.	20
3.4. Identificación de periodos de tiempo con deslumbramiento.	21

IV: ANÁLISIS DEL CASO APLICADO	22
V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	26
5.1. Conclusiones.....	26
5.2. Recomendaciones.....	27
BIBLIOGRAFÍA.....	28
ANEXOS	30
ANEXO A. Obtención Carta solar cilíndrica.....	31
ANEXO B. Obtención Perfil de Terreno.....	35

METODOLOGÍA DE IDENTIFICACIÓN DE PERIODOS Y TRAMOS DE VÍA CON DESLUMBRAMIENTO SOLAR

Autor: Manuel Alejandro Ortiz Pacheco

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío - Bío

Correo electrónico: manortiz@alumnos.ubiobio.cl

Profesor Patrocinante: Álvaro Suazo Schwencke

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío - Bío

Correo Electrónico: asuazo@ubiobio.cl

RESUMEN

Una buena visibilidad de la carretera y su entorno es un requisito básico para una conducción segura. El deslumbramiento que recibe el conductor por parte del Sol es un problema común en muchas carreteras. Por lo tanto es necesario contar con una metodología que permita la identificación de periodos y tramos de vía que presenten problemas de deslumbramiento solar.

En el presente proyecto de título se propone una metodología para determinar los días y horas del año, cuando el resplandor del Sol puede perjudicar la visión de los conductores en un tramo de carretera, en función de su ubicación geográfica, la dirección de visión del conductor y las características físicas del medio ambiente. La metodología de análisis propuesta se basa en la aplicación de cartas cilíndricas, para representar todo el conjunto de variables que intervienen en el problema. La metodología se puede aplicar a las carreteras existentes y a las de nuevo diseño.

Palabras Claves: Deslumbramiento, Cono de deslumbramiento, Carta solar cilíndrica, Visibilidad.

Número de palabras: $4604 + 15 \cdot 250 + 3 \cdot 250 = 9104$.

METHODOLOGY OF IDENTIFICATION OF PERIODS AND TRACK SECTIONS WITH SUN GLARE.

Author: Manuel Alejandro Ortiz Pacheco.

Department of Civil and Environmental Engineering, Bío - Bío University

Email: manortiz@alumnos.ubiobio.cl

Advisory Professor: Alvaro Suazo Schwencke

Department of Civil and Environmental Engineering, Bío - Bío University

Email: asuazo@ubiobio.cl

ABSTRACT

A good visibility of the road and its environment is a basic requirement for safe driving. Glare to the driver by the sun is a common problem on many roads. Therefore it is necessary to have a methodology for identifying periods and sections of track to submit solar glare problems.

This title project proposes a methodology to determine the dates and times of the year when the Sun's glare can impair the vision of drivers on a stretch of road, depending on their geographical location, direction of vision of the driver and the physical characteristics of the environment. The proposed analysis methodology is based on the application of cylindrical charts, to represent the entire set of variables involved in the problem. The methodology can be applied to existing roads and new design.

Keys Words: Glare, glare cone, cylindrical solar chart, visibility.

I: INTRODUCCIÓN.

En algunas horas del día existen momentos en que la luz solar provoca un fenómeno denominado deslumbramiento, el cual puede reducir sustancialmente la visibilidad de los conductores. Deslumbramiento es la pérdida momentánea de la visión producida por una luz o un resplandor muy intensos. En condiciones de deslumbramiento alto, la visibilidad de los objetos se reduce y objetos de bajo contraste pueden ser invisibles. La deficiencia visual causada por el deslumbramiento es un efecto fisiológico causado por la luz dispersada en el ojo sobre la retina, lo que reduce el contraste de la imagen. Esta reducción de contraste se llama deslumbramiento perturbador (Ministerio de Fomento, 2008). Después de la exposición a una iluminación brillante como la luz del sol, el efecto de interferencia visual persiste incluso después de que la fuente de iluminación se ha eliminado. Estos efectos pueden resultar en deficiencia visual prolongada y pueden ser peligrosos para las personas que requieran de una visión óptima, como conductores en la carretera. Los efectos del deslumbramiento son más críticos cuando una persona está observando a través de un medio óptico comprometido (por ejemplo, un parabrisas rayado o sucio).

La probabilidad de la ocurrencia de incidentes y accidentes aumenta cuando el resplandor del Sol afecta la visión de los conductores (Mitra, 2014). Esta situación es especialmente peligrosa en la entrada de una autopista, rampas de salida y en las intersecciones. Las condiciones de alto deslumbramiento producido cuando el Sol está a baja altura respecto al cielo, representan sólo una proporción relativamente pequeña del total de tiempo de conducción y estas tienden a ocurrir durante la alta densidad de tráfico (por ejemplo, durante los períodos punta que hay en la mañana y en la tarde).

En un estudio reciente, Mitra (2014) analizó las características relacionadas con el deslumbramiento, comparando y contrastando los accidentes que fueron afectados por la mañana y por la tarde debido al resplandor del Sol, encontrando así que el deslumbramiento tiene una fuerte influencia en la incidencia de choques.

En lugar de investigar la relación directa que puede existir entre los accidentes reportados y el deslumbramiento, Auffray et al. (2007) examinaron el impacto potencial entre el flujo de tráfico medido y el potencial de los vehículos que se verán afectados por el reflejo del Sol. Encontraron que el resplandor del Sol afecta a las distribuciones de velocidad y flujo durante los períodos de congestión y no congestión. También indicaron que la investigación futura puede examinar los datos de frecuencia de accidentes, para así poder considerar si es que el deslumbramiento efectivamente tiene un impacto directo en la seguridad vial.

Conociendo la importancia y preponderancia que tiene el fenómeno de deslumbramiento, es necesario poder establecer una metodología, que logre conocer los periodos en que existirá deslumbramiento en un determinado tramo de vía. Gracias a esto se podrá tomar decisiones respecto a cómo actuar sobre diversas situaciones relacionadas con la conducción, así como también decisiones en cuanto al diseño de nuevas vías.

1.1. Justificación.

Para una conducción segura es importante una buena visibilidad de la carretera y su entorno. En diversas vías existen tramos en los que, durante algunos minutos u horas de ciertos días, el Sol restringe la visibilidad de los conductores en un sentido. Por ende crear una metodología de identificación de periodos y tramos de vía, en donde se pueda producir el fenómeno de deslumbramiento solar, resulta ser propicio para materias de ingeniería de tránsito.

1.2. Objetivo General.

Proponer una metodología que permita la identificación de periodos y tramos de vía que presenten problemas de deslumbramiento solar.

1.3. Objetivos Específicos.

A partir del objetivo general del presente proyecto de título, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Determinar las diversas posiciones que tendrá el Sol a lo largo de un año respecto a una determinada ubicación en una vía.
- Identificar donde dirige su vista un conductor.
- Describir el área en la que el ojo se ve afectado por el resplandor del Sol, en diversos grupos de conductores
- Reconocer el perfil de terreno definido por los obstáculos existentes dentro del campo visual del conductor.
- Relacionar todas las variables que intervienen en el problema de deslumbramiento.

II: FACTORES DE DESLUMBRAMIENTO.

Son cuatro los factores principales que determinan la aparición de condiciones que puedan causar problemas de deslumbramiento en los conductores: Las trayectorias del Sol durante todo el año para cada ubicación geográfica, la dirección en la visual del conductor durante la marcha, el cono de deslumbramiento del conductor y la protección contra el sol proporcionada por la configuración del terreno. Analizar conjuntamente estas variables para cada sección de una carretera hará que sea posible determinar los problemas de deslumbramiento existentes.

2.1. Posición del Sol.

La posición y ubicación del Sol en un momento preciso se define en coordenadas locales por el ángulo de acimut y el ángulo de elevación. Los algoritmos desarrollados por Blanco-Muriel (2000) se aplican para determinar estas coordenadas.

2.1.1. Cálculo Día Juliano.

El primer paso en este algoritmo es calcular el Día Juliano (Ecuación 1), el cual representa el número de días y fracciones de días, transcurrido desde el 1 de marzo de 4800 antes de Cristo.

$$jd = \frac{1461}{4} \left[y + 4800 + \frac{m - 14}{12} \right] - \frac{3}{400} \left[y + 4900 + \frac{m - 14}{12} \right] + d + h/24 - 31708,5$$

Ecuación 1.

Para facilidad de cálculo el valor de la “jd” se normaliza en la Ecuación 2, de manera que el cero corresponde ahora con el mediodía del 1 enero del año 2000.

$$n = jd - 2451545 \quad \text{Ecuación 2.}$$

2.1.2. Cálculo de Coordenadas de la Eclíptica Solar.

Las coordenadas de la eclíptica del Sol se calculan simplemente como una función del día Juliano. El sistema de coordenadas eclíptico utiliza la eclíptica como plano fundamental. La eclíptica es el camino que el sol parece seguir por el cielo a lo largo de un año. En primer lugar, se calcula una variable auxiliar Ω .

$$\Omega = 2,1429 - 0,0010394594 n \quad \text{Ecuación 3.}$$

Entonces, la longitud media del Sol “L” y la anomalía media “g” se calculan.

$$L = 4,8950630 + 0,017202791698 n \quad \text{Ecuación 4.}$$

$$g = 6,2400600 + 0,0172019699 n \quad \text{Ecuación 5.}$$

Finalmente, la longitud “l” de la eclíptica se calcula como se muestra en la Ecuación 6 y la oblicuidad de la eclíptica “ep” como se muestra en la Ecuación 7.

$$l = L + 0,03341607 \text{ sen}(g) + 0,00034894 \text{ sen}(2g) - 0,0000203 \text{ sen}(\Omega) - 0,0001134 \quad \text{Ecuación 6.}$$

$$ep = 0,4090928 - 6,2140310 * 10^{-9} n + 0,0000369 \text{ cos}(\Omega) \quad \text{Ecuación 7.}$$

2.1.3. Convertir Coordenadas Eclípticas a Celestes.

Una vez que la posición del Sol se ha determinado en coordenadas de la eclíptica, las siguientes transformaciones se aplican para describir esta ubicación en coordenadas ecuatoriales. El sistema de coordenadas ecuatorial utiliza como ubicación fundamental la proyección del ecuador terrestre sobre la esfera celeste. Las ecuaciones para calcular la ascensión recta “ ra ” (Ecuación 8) y declinación “ δ ” (Ecuación 9) son simplemente transformaciones de las coordenadas de la eclíptica.

$$ra = \tan^{-1} \left[\frac{\cos(ep)\text{sen}(l)}{\cos(l)} \right] \quad \text{Ecuación 8.}$$

$$\delta = \text{sen}^{-1}[\text{sen}(ep) \text{sen}(l)] \quad \text{Ecuación 9.}$$

2.1.4. Convertir Coordenadas Celestes a Horizontales.

El paso final de este algoritmo es convertir la posición solar ecuatorial en coordenadas horizontales. Así se completa el proceso en el que la posición del Sol se encuentra referida respecto a la ubicación de un observador.

El primer paso en este proceso es calcular la media de tiempo sidéreo de Greenwich (GMST).

$$gmst = 6,6974243242 + 0,0657098283 n + h \quad \text{Ecuación 10.}$$

Entonces, la GMST se ajusta a la media Tiempo Sideral Local (LMST).

$$lmst = (15 gmst + Long) * \left(\frac{\pi}{180}\right) \quad \text{Ecuación 11.}$$

A continuación, el ángulo horario se calcula en función de la LMST y la ascensión recta.

$$\omega = lmst - ra \quad \text{Ecuación 12.}$$

En este punto, todas las transformaciones se completan para permitir el cálculo directo de la posición relativa del Sol. El ángulo de acimut se calcula según la fórmula mostrada en la Ecuación 13.

$$\gamma = \tan^{-1} \left[-\frac{\text{sen}(\omega)}{\tan(\delta) \cos(\varnothing) - \text{sen}(\varnothing) \cos(\omega)} \right] \quad \text{Ecuación 13.}$$

Finalmente el Ángulo Cenital “ θ_z ” se calcula como se muestra en la Ecuación 14.

$$\theta_z = \cos^{-1}[\cos(\varnothing) \cos(\omega) \cos(\delta) + \text{sen}(\delta) \text{sen}(\varnothing)] \quad \text{Ecuación 14.}$$

Mediante la aplicación de los algoritmos propuestos por Blanco-Muriel et al. (2000), se pueden calcular las trayectorias solares para todo el año o para un determinado período de estudio, en una ubicación específica definida por sus coordenadas geográficas (latitud y longitud). En la metodología aquí propuesta, el análisis utiliza la información de un año y se representa mediante una Carta Solar Cilíndrica utilizando el programa Ecotect Analysis (Autodesk, 2011), cuyo funcionamiento se detalla en el Anexo A.

La Carta Solar Cilíndrica es un gráfico que representa la trayectoria del Sol durante todo el año, vista desde un plano horizontal. Consiste en transformar la bóveda celeste en un cilindro tangente a esta, de forma tal que el trazo de las horas de las proyecciones vertical y horizontal se resuelva con líneas rectas paralela (Guillermo Enrique Gonzalo, 2003), tal como muestra la Figura 1.

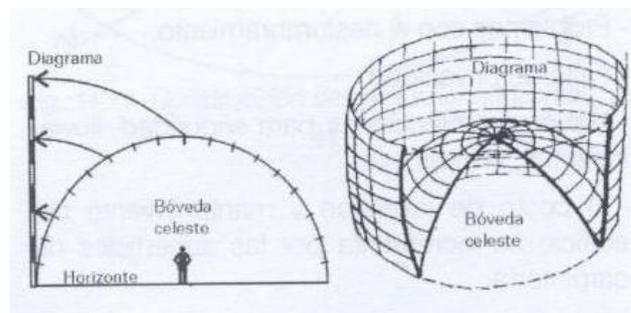


Figura 1: Proyección Solar Cilíndrica Desarrollada.

Fuente: Manual de Arquitectura Bioclimática (2003)

2.2. Dirección de la línea de visión.

Para analizar el deslumbramiento debe ser considerada la dirección de la vista del conductor. La tecnología de escaneo del ojo, tanto en condiciones reales y simuladas, se ha utilizado para obtener información sobre que ven los conductores al momento de conducir. Harbluk et al. (2002) demuestran que el 80% de todas las fijaciones están directamente delante del conductor, ocupando el 15% del campo visual. El 20% de las fijaciones restantes se dividen en la periferia izquierda y derecha respecto a la posición del conductor, el cual en este estudio se encuentra posicionado en el lado izquierdo del vehículo.

Para la fijación es necesario considerar un punto central dentro del 15% del campo visual. Recarte y Nunes (2000) encontraron que la fijación visual horizontal media es de $0,5^\circ$ del punto central (valor central de 0°), con una desviación estándar de $\pm 2^\circ$, y la fijación visual vertical media es de un -1° del centro, con una desviación estándar de $\pm 1^\circ$ (ver Figura 2).

En el Manual de Carreteras (MOP, 2014) se muestra que la altura promedio desde el suelo hasta los ojos del conductor es de 1,10 m. Por lo tanto si se considera que la fijación visual vertical está a -1° del centro, se puede asumir que la línea de visión del conductor se dirige a un punto de la calzada 60 metros por delante de la posición de conductor. Al existir una gran distancia y un pequeño ángulo en la fijación visual de conductor, en este estudio se asumirá que el observador dirige su vista perpendicular a la calzada, no considerando movimientos laterales.

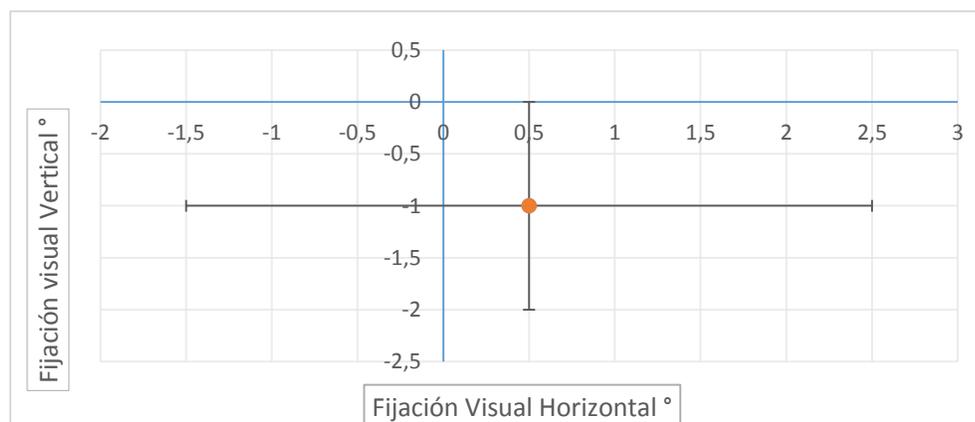


Figura 2: Media y desviación estándar de la fijación visual horizontal y vertical.

Fuente: Elaboración propia.

2.3. Cono de deslumbramiento.

El deslumbramiento perturbador es causado por la luz dispersada dentro del ojo, provocando una nube de luminancia de velo, que disminuye el contraste y reduce la capacidad de percibir la información visual necesaria para una actividad en particular. La luminancia es una magnitud física que indica la cantidad de luz emitida por un ente luminoso. El deslumbramiento perturbador se produce como resultado de excesiva luminancia en el campo visual o por diferencias en la luminancia a la que el ojo no puede adaptarse. La fuente de deslumbramiento crea luz dispersa, que se extiende sobre la retina como un velo y reduce sustancialmente el contraste de las imágenes proyectadas en la misma.

La ecuación de deslumbramiento es el resultado de casi un siglo de debate científico e investigación sobre deslumbramiento perturbador. Según Johannes (2002) la ecuación general de la CIE, es la versión más común para cuantificar el deslumbramiento perturbador. Es válida en el dominio $0.1^\circ < \theta < 100^\circ$, y dice lo siguiente:

$$\left(\frac{L_{\text{velo}}}{E_{\text{deslum}}} \right) = \frac{10}{\theta^3} + \left(\frac{5}{\theta^2} + 0,1 \frac{p}{\theta} \right) \left(1 + \left(\frac{\text{edad}}{62,5} \right)^4 \right) + 0,0025p \quad \text{Ecuación 15.}$$

Donde:

L_{velo} = Luminancia de velo (cd/m^2).

E_{deslum} = Iluminancia emitida por la fuente de deslumbramiento (lx).

θ = Distancia angular entre la línea de visión y fuente de deslumbramiento ($^\circ$).

p = Valor que depende de la pigmentación ocular (que van desde $p = 0$ para los ojos negros hasta $p = 1,2$ para los ojos claros).

edad = Edad del conductor (años).

Un objeto que es medianamente visible en ausencia del reflejo del Sol no es visible cuando hay resplandor, a menos que se aumentan los contrastes reales. La cantidad de contraste adicional requerida para asegurar la visibilidad razonable del objeto, comparando lo observado con el reflejo del sol y el contraste original, es una medida de la pérdida de visibilidad debida al deslumbramiento provocado por el sol. Se le conoce como el incremento de umbral de contraste TI (Ministerio de Fomento, 2008).

Según Jurado-Piña y Pardillo (2009), en el caso de niveles de luminancia media en la calzada superiores a 5 cd/m^2 , el incremento umbral de contraste viene dado por:

$$TI = 95 \frac{L_{\text{velo}}}{L_m^{1,05}} \quad \text{Ecuación 16.}$$

Donde:

TI = Incremento de umbral de contraste (%)

L_{velo} = Luminancia de velo (cd/m^2).

L_m = Luminancia media de la calzada (cd/m^2).

Para valores altos de TI, el brillo es intenso. Los valores comprendidos entre el 15% y el 20% se consideran como valores máximos tolerables para carreteras con iluminación artificial. Con las Ecuaciones 15 y 16 se obtiene el incremento umbral de contraste, como una función de la distancia angular en entre la línea de visión y la posición del Sol. La Figura 3 muestra una gráfica de esta función, para personas con valor $p = 1$ para el color de ojos claro y de diferentes edades para valores típicos de luz solar: la iluminación externa es de 100000 lx y la superficie de la carretera tiene una luminancia de 8000 cd/m^2 (Jurado-Piña y Pardillo, 2009). Como se observa en la Figura 3, las personas con color de ojos negro ($p = 0$) son menos susceptibles que una persona con los ojos claros ($p = 1$).

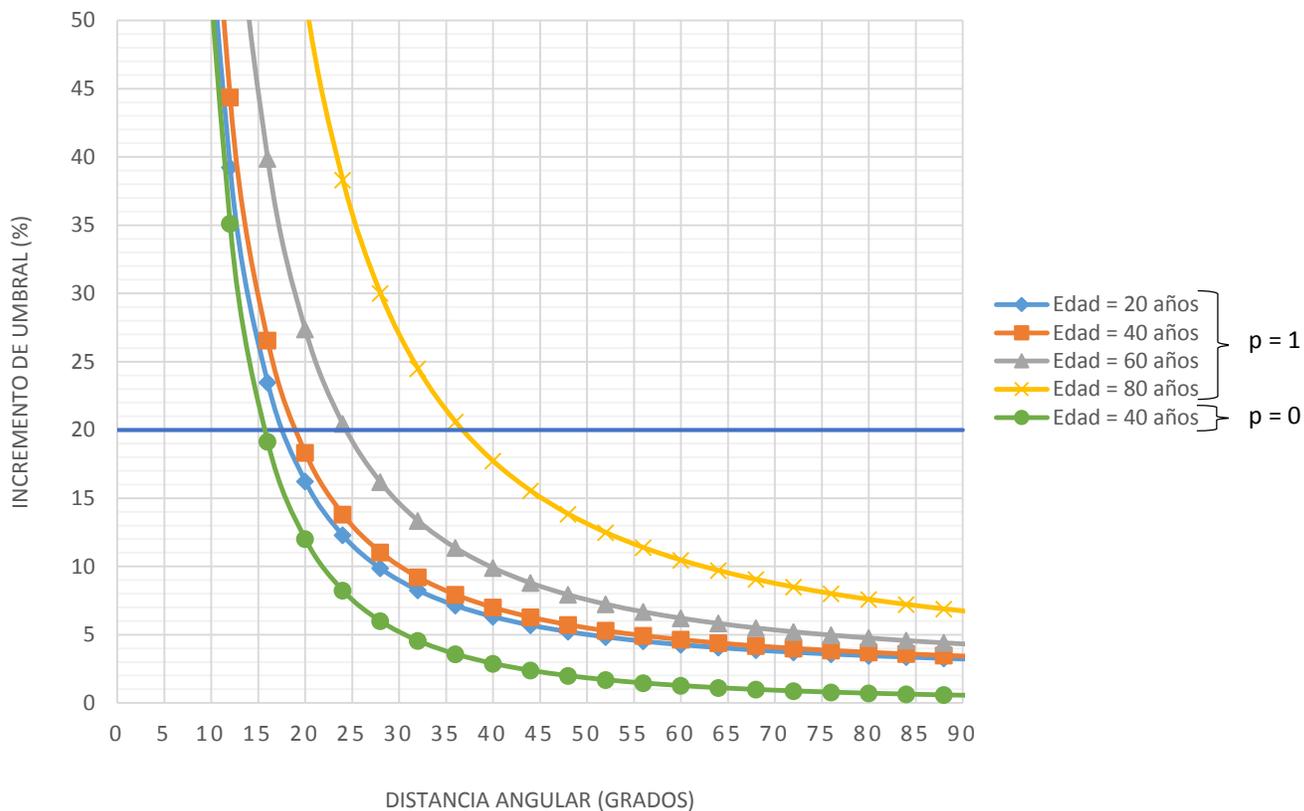


Figura 3: Incremento umbral de contraste en función de la distancia angular.

Fuente: Elaboración propia.

Las molestias debidas al deslumbramiento aumentan considerablemente cuando el ángulo es menor que el valor correspondiente al punto de inflexión de las curvas, para cada grupo de edad.

Para este análisis, se asume que la molestia para el conductor es similar a un cono de deslumbramiento específico, definido por un valor angular constante alrededor de la línea de visión. Es una práctica común en el diseño de alumbrado para carreteras adoptar un 20% como el valor máximo tolerable para el contraste TI. Sobre esta base, se pueden asumir dos valores de deslumbramiento para caracterizar situaciones problemáticas debidas al Sol, para conductores de 20 años y 60 años de edad, adoptando un valor $p = 1$. Los valores de los ángulos son 18° y 25° respectivamente.

2.4. Configuración de terreno.

Dependiendo de la configuración del terreno alrededor de la carretera, los ojos del conductor pueden estar protegidos del Sol en ciertos ángulos (Figura 4). Por esta razón, una variable que debe ser considerada en el estudio de problemas provocados por el deslumbramiento, es el perfil definido por los obstáculos existentes dentro del campo visual, ya que este bloquea los rayos del Sol que puedan existir en la dirección de la línea de visión del conductor.



Figura 4: Perfil de terreno Km 75 ruta CH-156, Ac: -30° dirección NO.

Fuente: Elaboración propia.

III: METODOLOGÍA PARA IDENTIFICAR PERIODOS Y TRAMOS CON DESLUMBRAMIENTO SOLAR.

Los problemas que trae un Sol bajo en el cielo no solo afecta a los ojos del conductor, sino que también puede interferir en la capacidad de la vía, ya que el deslumbramiento perturbador causado al conductor reduce los niveles de velocidad y por lo tanto la categoría de la vía. Es propicio conocer como se ve afectado el conductor con el deslumbramiento solar para así tomar las medidas de mitigación necesarias. Para esto se debe conocer la posición del Sol respecto a la posición del vehículo en una línea de visión específica.

Es necesario considerar una ruta para así lograr una correcta comprensión de la metodología a proponer. El punto en el cual se tomaron los datos se encuentra en el Km 75 de la ruta CH-156 (Figura 5), la que es más conocida como Ruta de la Madera. Esta consta de un camino bidireccional con una pista por sentido. La ubicación del punto medido tiene por coordenadas $37,3605^{\circ}$ S y $72,8338^{\circ}$ O.



Figura 5: Localización del punto medido

Fuente: Google maps.

Respecto a la línea de visión del conductor la dirección de la ruta tiene un acimut de -30° en dirección NO con una altitud de 0° (Dirección Santa Juana) y un acimut de 150° en dirección SE con una altitud de 0° (Dirección Nacimiento). El punto de estudio tiene una intersección, la cual respecto a la línea de visión del conductor tiene un acimut de 50° en dirección NE con una altitud de 8° (Ingreso camino local) y un acimut de -130° en dirección SO con una altitud de -8° (Salida camino local).

3.1. Posiciones del sol.

La carta solar cilíndrica permite trazar las diferentes posiciones que tendrá el Sol durante un año. El programa Ecotect Analysis permite la obtención de la carta solar a lo largo de un año, o para un determinado día en específico, ingresando los datos de latitud y longitud. La posición del Sol en un momento determinado se representa en el gráfico como un punto por medio de su acimut como valor de la abscisa y su elevación como el valor de la ordenada (Figura 6). La escala utilizada para determinar la elevación solar va de -10° a 90° y para determinar el acimut va de -180° a 180° , abarcando así todas las posibles posiciones del observador en una determinada hora y lugar. La carta solar representa un año completo, subdividiéndose este año en meses respecto a cada color. Cada línea es un día en particular, separándose estos cada siete días.

El huso horario considerado es el existente en Chile, el que es GMT -4, siendo el horario el cual reconoce el programa Ecotect Analysis para la realización de gráficos respecto a las coordenadas ingresadas. Para estudiar el deslumbramiento es necesario considerar la hora civil del país en cuestión, por lo tanto, si un país está dentro de un DST (tiempo de ahorro de energía diurna) es necesario hacer una corrección al horario GMT original. El estudio es realizado con la hora civil en Chile, la cual es GMT -3, desplazándose de esta forma en una hora los horarios originales respecto al programa Ecotect Analysis.

Existen dos formas en las que se comporta el Sol en una carta solar cilíndrica, una que va desde Enero hasta Junio (Figura 6a) y otra que va desde Junio hasta Diciembre (Figura 6b).

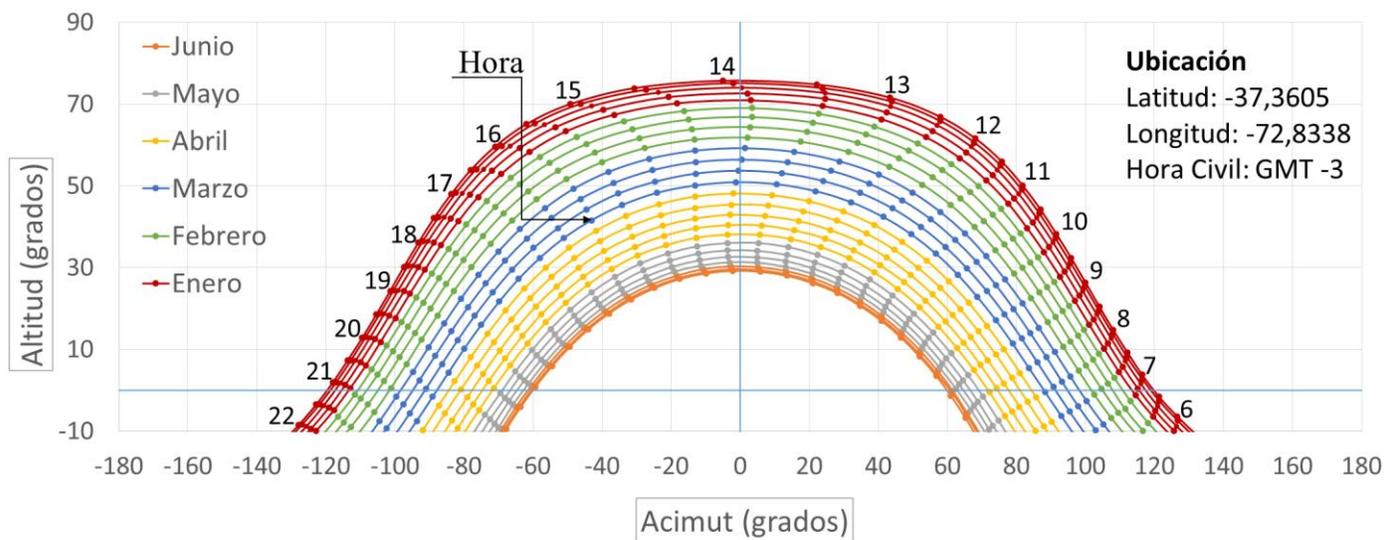


Figura 6a: Carta Solar Cilíndrica Enero a Junio.

Fuente: Elaboración propia.

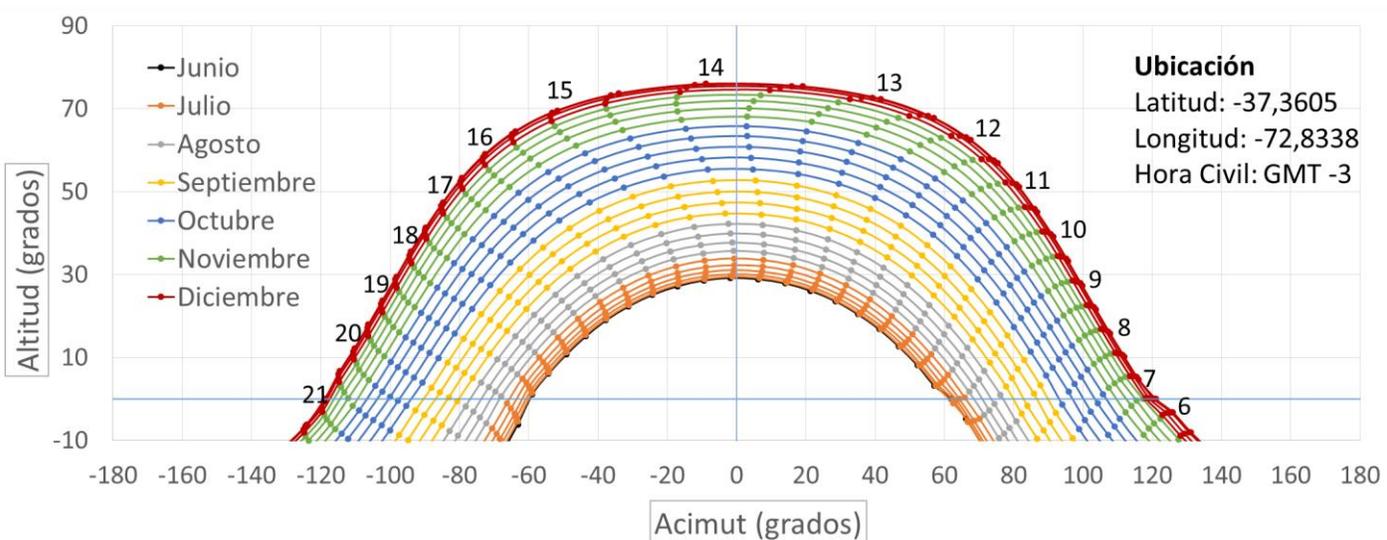


Figura 6b: Carta Solar Cilíndrica Junio a Diciembre.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Línea de visión y cono de deslumbramiento.

Para analizar el impacto del Sol en los ojos del conductor, se debe tener en cuenta las condiciones visuales impuestas por la carretera, para así representar el campo de visión del conductor en el gráfico solar. Para una posición específica del conductor, la dirección de la línea de visión se determina por su acimut y elevación. En el gráfico cilíndrico, la dirección de la línea de visión es representada por un punto (Figura 7). Alrededor de este punto existen diferentes conos de deslumbramiento, que representan las diferentes capacidades de captar la luz respecto a cada grupo de edad. La Figura 7 muestra los conos de deslumbramiento para los valores característicos de 18° y 25° (20 y 60 años) que se identificaron previamente. Ambos conos son analizados para cada posición que pueda tener el conductor en las coordenadas 37,3605° S y 72,8338° O.

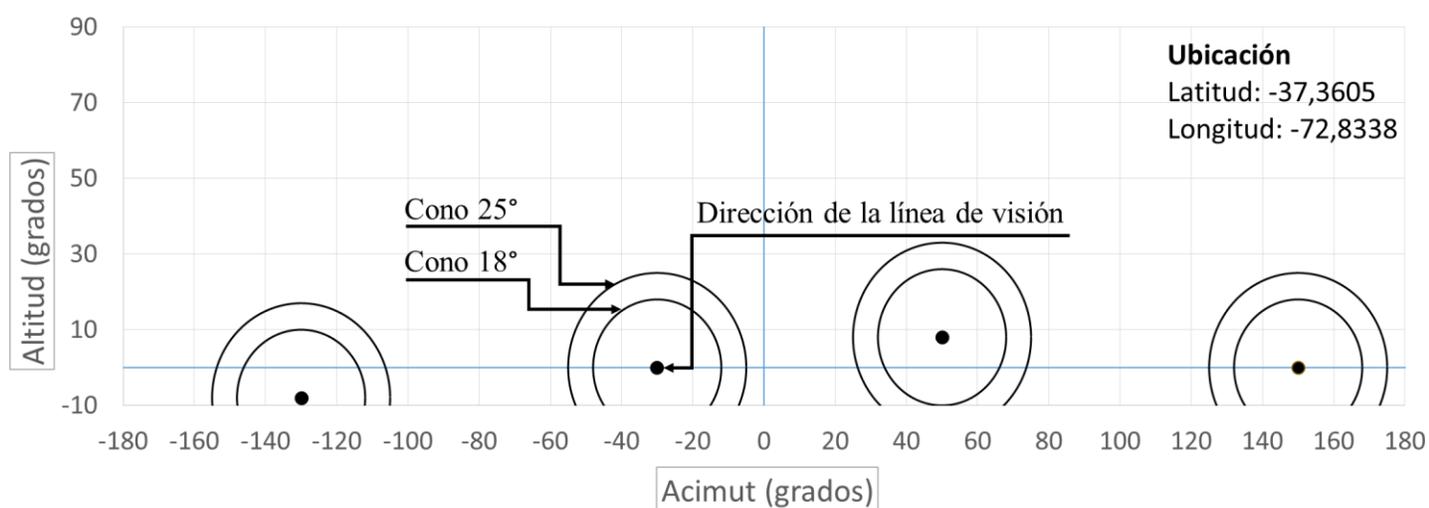


Figura 7: Dirección de la línea de visión y conos de deslumbramiento en el cruce analizado en la ruta CH-156

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Perfil de terreno.

El perfil de terreno está definido para una posición específica por un conjunto de pares de valores de Acimut-Altitud que cubren el campo visual. Estos valores se pueden obtener a partir de un modelo digital del terreno si está disponible o por medio de un levantamiento topográfico de las carreteras existentes.

La Figura 8 muestra el perfil obtenido en el km 75 de la ruta CH-156 mediante un levantamiento topográfico con taquímetro, con el que se obtuvieron tanto datos de acimut como de altitud respecto a la ubicación establecida (Ver Anexo B). El levantamiento topográfico se realizó cada 5°, logrando un nivel de detalle eficiente para los requerimientos del punto en estudio. La altura de instalación del equipo es a 1,10 m para así simular la altura del ojo del conductor, instalándose éste a un costado de la calzada debido a la imposibilidad de poner el equipo en donde circulan los vehículos.

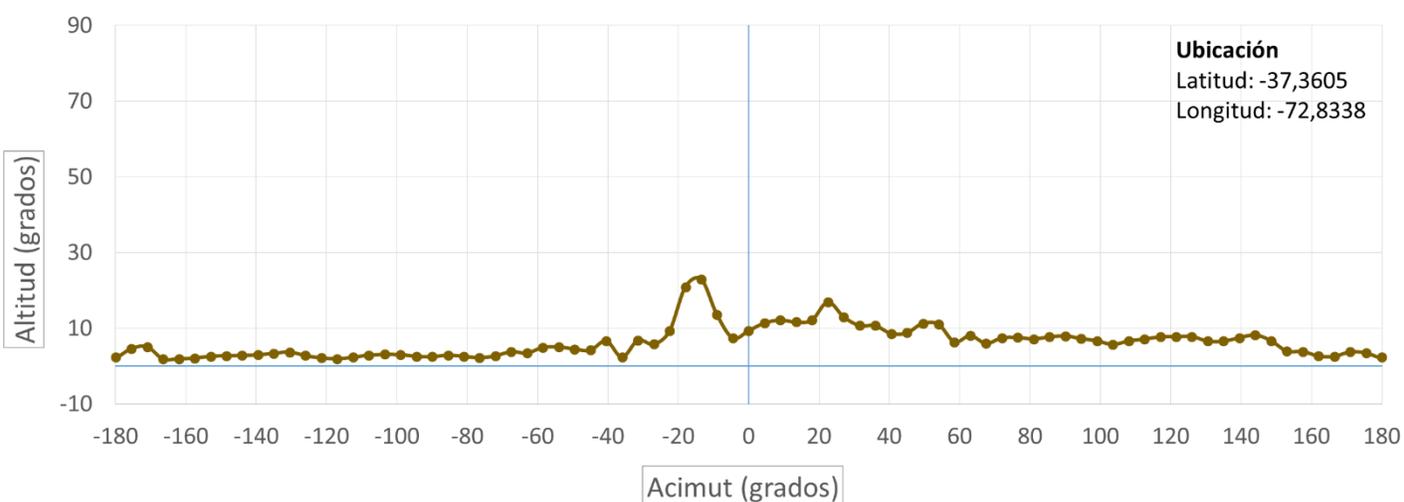


Figura 8: Perfil de terreno Km 75 ruta CH-156

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Identificación de periodos de tiempo con deslumbramiento.

Para lograr detectar los periodos de tiempo en que se producen las condiciones de deterioro visual en la carretera, se deben analizar en conjunto los caminos solares, la dirección de la línea de visión, los conos de deslumbramiento y el perfil de terreno del punto en estudio.

La ventaja de la carta solar cilíndrica es que las obstrucciones visuales entre el conductor y la posición del Sol pueden ser representadas en el gráfico, por lo que es posible tener en cuenta todos los factores que intervienen en el problema. Las Figuras 9a y 9b muestran en detalle los periodos en los que existe deslumbramiento solar para la ubicación ya descrita. Estos periodos se muestran por medio del área pintada dentro del cono de deslumbramiento.

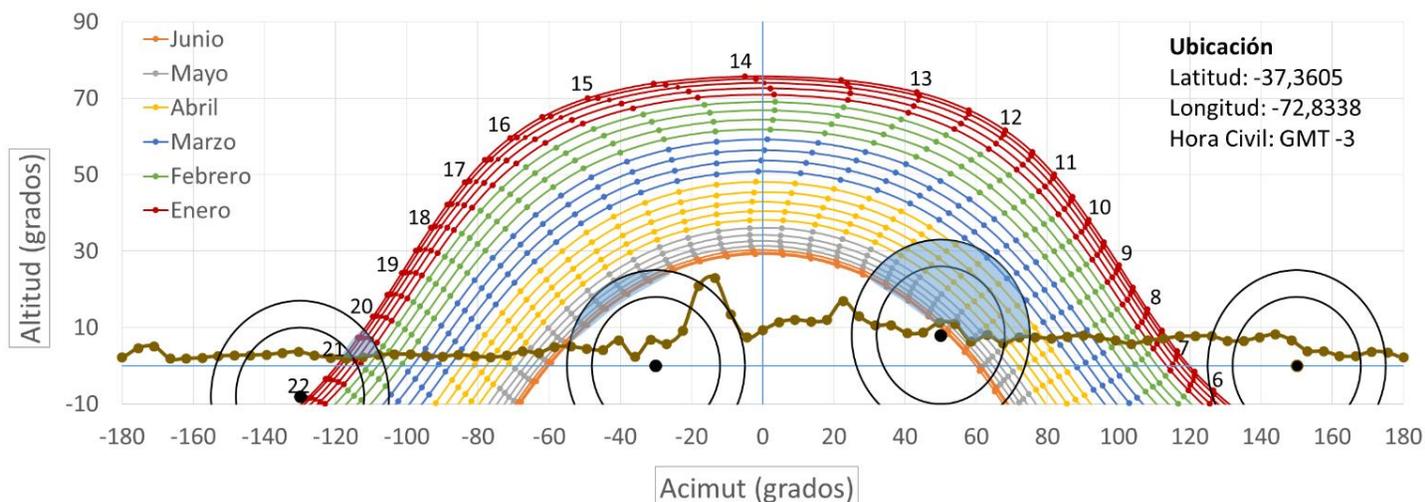


Figura 9a: Periodos de deterioro de la visión por deslumbramiento solar en la ruta CH-156, de Enero a Junio.

Fuente: Elaboración propia.

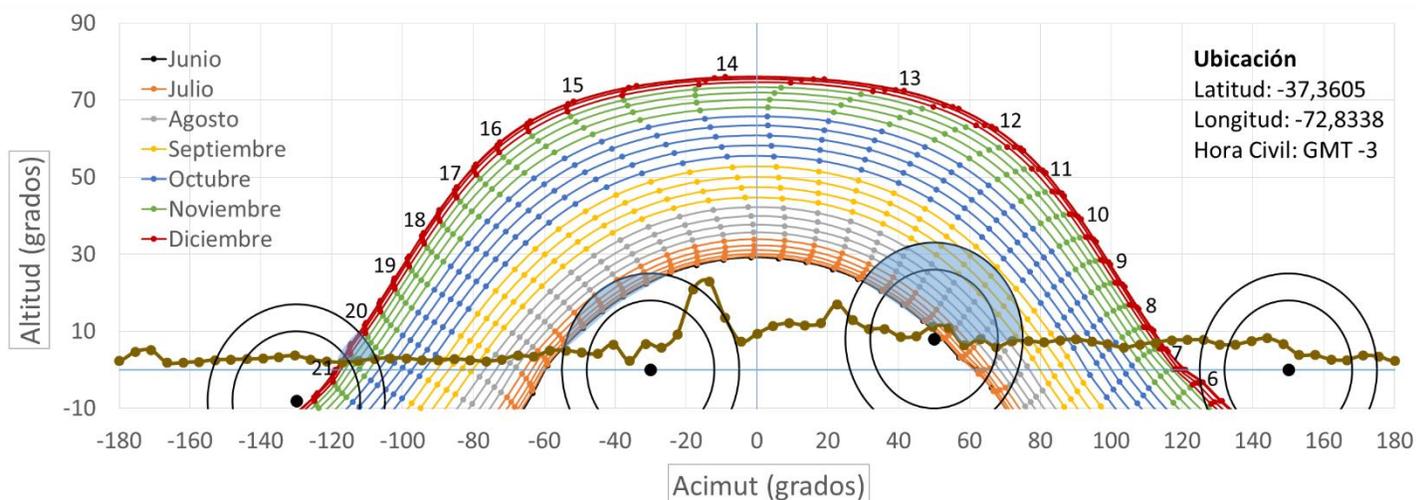


Figura 9b: Periodos de deterioro de la visión por deslumbramiento solar en la ruta CH-156, de Junio a Diciembre.

Fuente: Elaboración propia.

IV: ANÁLISIS DEL CASO APLICADO

Para cada ubicación que pueda tener el conductor existe un riesgo de deslumbramiento diferente, por lo tanto, evaluar cada una de las posibles direcciones que pueda desarrollar el conductor, permitirá conocer en detalle los periodos de tiempo en donde exista deslumbramiento solar. Todos los conos a estudiar tienen la misma ubicación, $37,3605^{\circ}$ S y $72,8338^{\circ}$ O. El periodo a analizar es de Enero a Junio, donde cada color representa un mes diferente (Figura 9a).

A partir de la Figura 10 (a, b y c) se puede identificar los días y horas del año en que el resplandor del Sol afectaría la visión de los conductores para la ubicación establecida. Estos días serán aquellos en que la posición del Sol está dentro de los conos deslumbramiento y por encima de la línea que define el perfil de terreno. No en todas las dirección existe deslumbramiento, ejemplo de tal situación es lo que se muestra en la Figura 10d, en donde el cono en dirección SE aunque intersece en parte con los desplazamientos solares, nunca existirá deslumbramiento debido a la configuración de terreno del lugar.

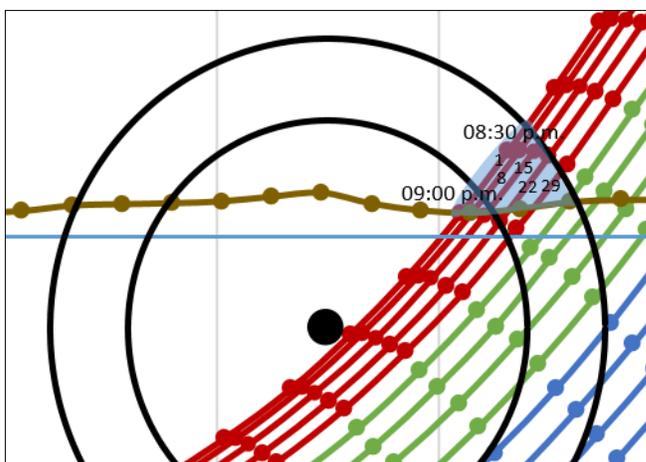


Figura 10a: Cono dirección SO, Ac: -130° , Al: -8° . Salida camino local.

Fuente: Elaboración propia

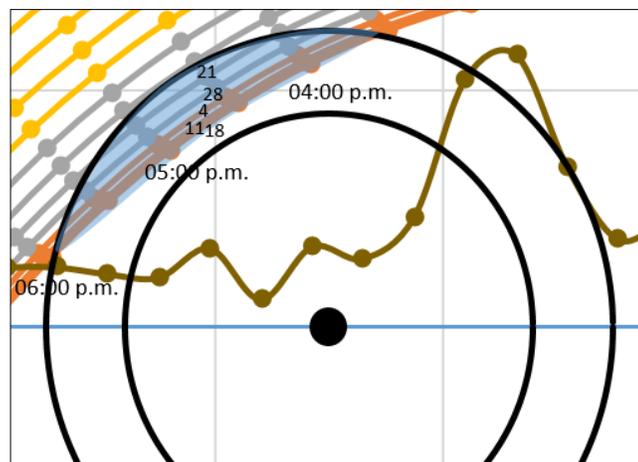


Figura 10b: Cono dirección NO, Ac: -30° , Al: 0° . Dirección Santa Juana.

Fuente: Elaboración propia

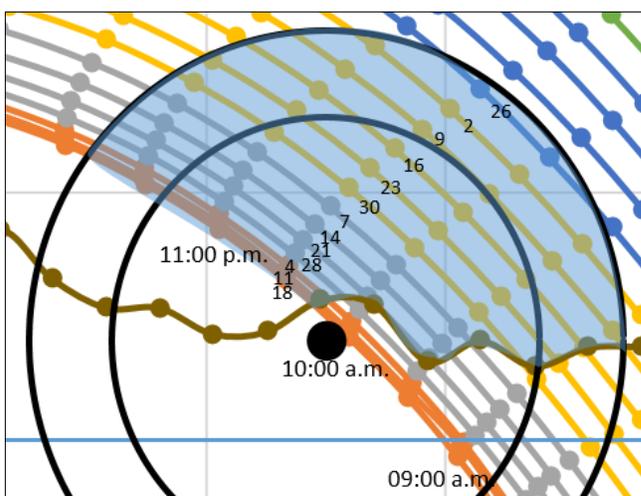


Figura 10c: Cono dirección NE, Ac: 50° , Al: 8° . Ingreso camino local.

Fuente: Elaboración propia

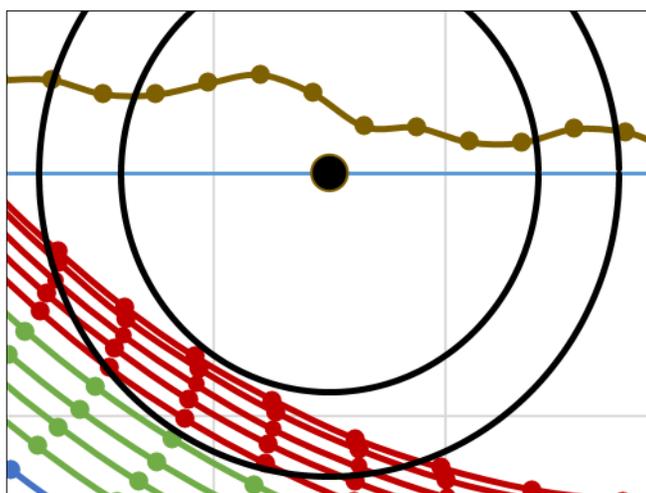


Figura 10d: Cono dirección SE, Ac: 150° , Al: 0° . Dirección Nacimiento.

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 1 (a, b y c) se muestra en detalle la fecha y hora en que existirá deslumbramiento tanto para conductores de 20 años, así como para conductores de 60 años de edad (Cono de 18° y 25° respectivamente).

Tabla 1a: Deslumbramiento en cono dirección SO, Salida camino local.

Fuente: Elaboración propia.

Fecha	Hora
	60 años
21-may	04:00 p.m. - 05:15 p.m.
28-may	03:50 p.m. - 05:30 p.m.
04-jun	03:45 p.m. - 05:45 p.m.
11-jun	03:40 p.m. - 05:50 p.m.
18-jun	03:30 p.m. - 06:00 p.m.

Tabla 1b: Deslumbramiento en Cono dirección NO, Dirección Santa Juana.

Fuente: Elaboración propia.

Fecha	Hora	
	20 años	60 años
01-ene	08:50 p.m. - 09:00 p.m.	08:20 p.m. - 09:00 p.m.
08-ene	08:55 p.m. - 09:00 p.m.	08:25 p.m. - 09:00 p.m.
15-ene		08:30 p.m. - 09:00 p.m.
22-ene		08:30 p.m. - 08:55 p.m.
29-ene		08:35 p.m. - 08:50 p.m.

Tabla 1c: Deslumbramiento en cono dirección NE, Ingreso camino local.

Fuente: Elaboración propia.

Fecha	Hora	
	20 años	60 años
26-mar		09:30 a.m. - 10:45 a.m.
02-abr		09:10 a.m. - 11:05 a.m.
09-abr	10:00 a.m. - 10:30 a.m.	09:00 a.m. - 11:20 a.m.
16-abr	09:30 a.m. - 10:45 a.m.	09:00 a.m. - 11:25 a.m.
23-abr	09:10 a.m. - 10:55 a.m.	09:00 a.m. - 11:30 a.m.
30-abr	09:05 a.m. - 11:00 a.m.	09:05 a.m. - 11:35 a.m.
07-may	09:25 a.m. - 11:05 a.m.	09:25 a.m. - 11:35 a.m.
14-may	09:25 a.m. - 11:10 a.m.	09:25 a.m. - 11:40 a.m.
21-may	09:00 a.m. - 11:15 a.m.	09:25 a.m. - 11:45 a.m.
28-may	10:10 a.m. - 11:20 a.m.	10:10 a.m. - 11:45 a.m.
04-jun	10:15 a.m. - 11:20 a.m.	10:15 a.m. - 11:50 a.m.
11-jun	10:15 a.m. - 11:20 a.m.	10:15 a.m. - 11:50 a.m.
18-jun	10:15 a.m. - 11:20 a.m.	10:15 a.m. - 11:55 a.m.

Para el cono en dirección SE no existen fechas y horas con deslumbramiento solar, ya que el Sol nunca pasa por un punto por sobre el perfil de terreno, por lo tanto, el conductor en esta dirección no se ve afectado por deslumbramiento.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos son considerando un cielo totalmente despejado, por lo tanto, no se consideran los diversos efectos climáticos en el estudio. Días con nubosidad parcial o totalmente nublados, ayudarían a reducir los tiempos en los que pueda existir deslumbramiento solar. Efectos climáticos como lo son la niebla y la nieve, producen incapacidad visual considerando otros aspectos físicos, los cuales podrían ser abordados en otro estudio

V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. Conclusiones.

La investigación presentada logra establecer una metodología útil, la cual sirve para identificar los potenciales deterioros en la visión del conductor causados por el deslumbramiento solar, para condiciones de tramos y direcciones predefinidas. Los resultados que se pueden obtener con la metodología pueden ser utilizados para estudiar el problema en tramos de carreteras existentes o de nuevo diseño.

De acuerdo a la investigación desarrollada se concluye lo siguiente:

- La obtención de las diversas posiciones que tendrá el Sol a lo largo de un año, utilizando la carta solar cilíndrica, resulta ser una herramienta clave para conocer las fechas y periodos en las cuales el conductor sufrirá incapacidad visual por deslumbramiento, para una posición en específico.
- La dirección de visión del conductor junto con el cono de deslumbramiento propio de cada conductor, forman la fusión de conceptos ideal para estudiar el fenómeno de deslumbramiento en distintos grupos de conductores, considerando personas de distintas edades y diferentes tonalidades en el color de ojos.
- El conocimiento de los obstáculos dentro del campo visual del conductor (perfil de terreno), permite descender el área de deslumbramiento comprometida en algún punto de estudio.
- Cada una de las variables que determinan la aparición de condiciones que puedan causar problemas de deslumbramiento en los conductores, tienen gran importancia al momento de evaluar el fenómeno. La relación de éstas hace que sea posible determinar el alcance y la frecuencia de los problemas de deslumbramiento.

5.2. Recomendaciones.

De acuerdo al trabajo desarrollado se proponen las siguientes recomendaciones para una investigación futura:

- La metodología resulta ser una herramienta valiosa para considerar medidas de mitigación en la carretera. Se puede sugerir como medida poner carteles de advertencia de deslumbramiento, para que así los usuarios puedan tomar medidas de mitigación con anterioridad (uso de gafas, utilizar visera del vehículo). Otra sugerencia es poner un sembrado de árboles, los cuales puedan cubrir el sol de manera que se pueda eliminar por completo el deterioro en la visión debido al deslumbramiento solar. Entregar la información de deslumbramiento utilizando algún medio de comunicación, ayudaría a que las personas puedan planificar sus horas de viaje con anterioridad, para que así puedan circular por las carreteras sin mayores inconvenientes.
- La investigación futura se centra en un sistema que pueda considerar segmentos completos de carreteras, ya sean existentes o de nuevo diseño, para así tener todos los datos necesarios para tomar las medidas de mitigación o de diseño necesarias.

BIBLIOGRAFÍA.

- Auffray, and R. L. Bertini. Empirical Investigation of Impacts of Sun-Related Glare on Traffic Flow. Presented at 87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2008.
- Autodesk. Autodesk Ecotect Analysis. Program designed by Autodesk, copyright, 2011.
- Blanco-Muriel. Computing the Solar Vector. Plataforma Solar de Almería, Aptdo. 22, E-04200 Tabernas, Almería, Spain, 2000.
- Guillermo Enrique Gonzalo. Manual de Arquitectura Bioclimática. Arquitectura Solar y Ecológica, Nobuko, 2003.
- Harbluk, J. L., Y. I. Noy, and M. Eizenman. The Impact of Cognitive Distraction on Driver Visual Behaviour and Vehicle Control. Publication TP 13889 E. Ergonomics Division, Road Safety Directorate and Motor Vehicle Regulation Directorate, Transport Canada, 2002.
- Jurado-Piña Rafael and Pardillo Mayora José. Methodology to Predict Driver Vision Impairment Situations Caused by Sun Glare. Journal of the Transportation Research Board, No. 2120, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2009, pp. 12–17.
- Johannes J. Vos. Reflections on glare. Emeritus TNO Human Factors, Kampweg 5, Soesterberg, The Netherlands, 2002.
- Mitra, S. Sun glare and road safety: An empirical investigation of intersection crashes. Civil Engineering Department, Indian Institute of Technology Kharagpur, Kharagpur, West Bengal, India, 2014.

- MOP. Manual de Carreteras Volumen 3. Instrucciones y Criterios de Diseño. Ministerio de Obras Públicas, Chile, 2014.
- Ministerio de Fomento. Reglamento de Eficiencia Energética en Instalaciones de Alumbrado Exterior. España, 2008.
- Recarte, M. A., and L. M. Nunes. Effects of Verbal and Spatial-Imagery Tasks on Eye Fixations While Driving. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, Vol. 6, No. 1, 2000, pp. 31-43.

ANEXOS

ANEXO A. Obtención Carta solar cilíndrica.

Para lograr obtener la carta solar cilíndrica es necesario contar el con programa Ecotect Analysis. A continuación se muestran los pasos a seguir para poder obtener los datos necesarios para lograr fabricar la carta solar cilíndrica.

Paso 1: Ingresar a la pestaña “PROJECT” e ingresar los datos de latitud y longitud del lugar de estudio (Figura A1). Al ingresar los datos de ubicación se cambiara automáticamente la zona horaria del lugar en estudio.

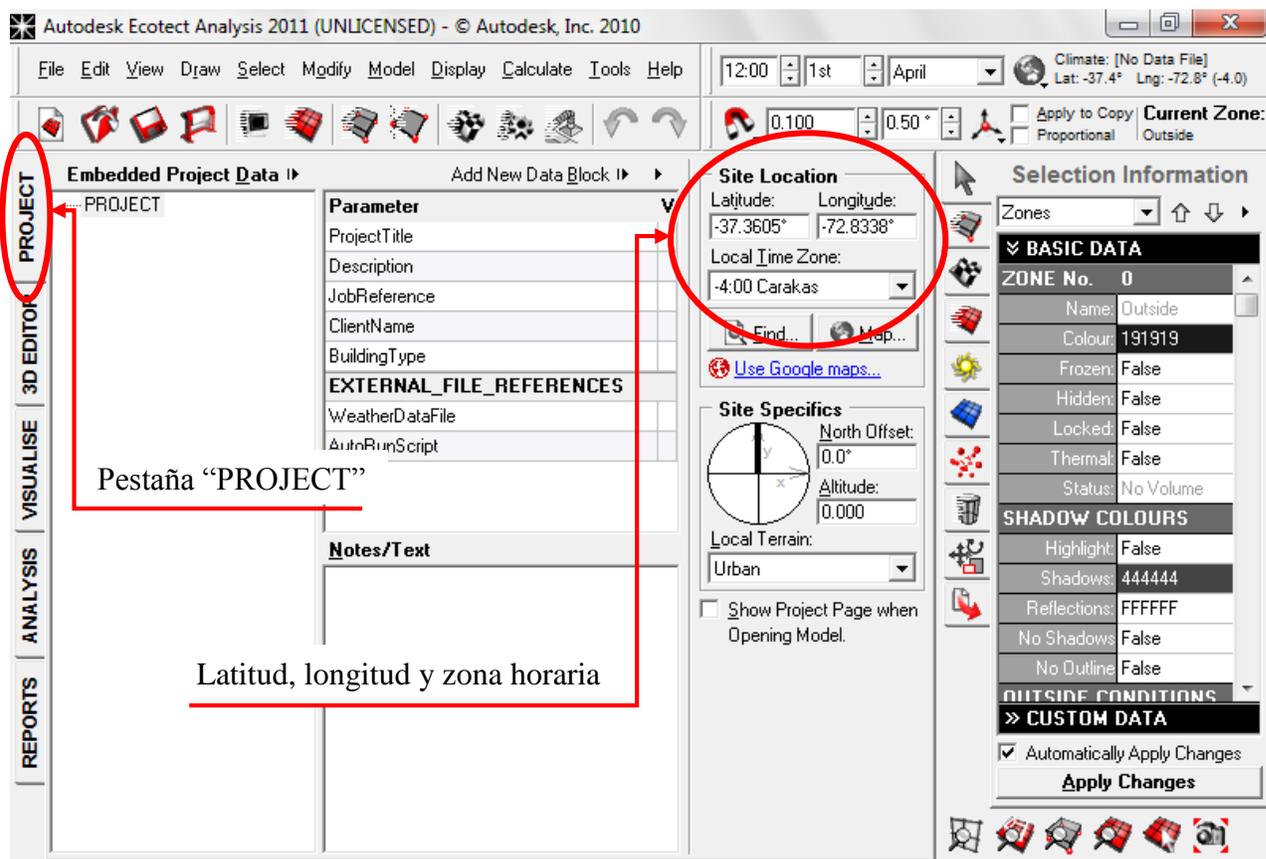


Figura A1: Datos de localización.

Fuente: Software Ecotect Analysis, 2011.

Paso 2: Ir a la barra de tareas y presionar en “Calculate”. Una vez desplegadas las opciones presionar sobre “Sun-Path Diagram” (Figura A2), para así abrir la pestaña que nos permite obtener distintos tipos de gráficas y tablas solares.

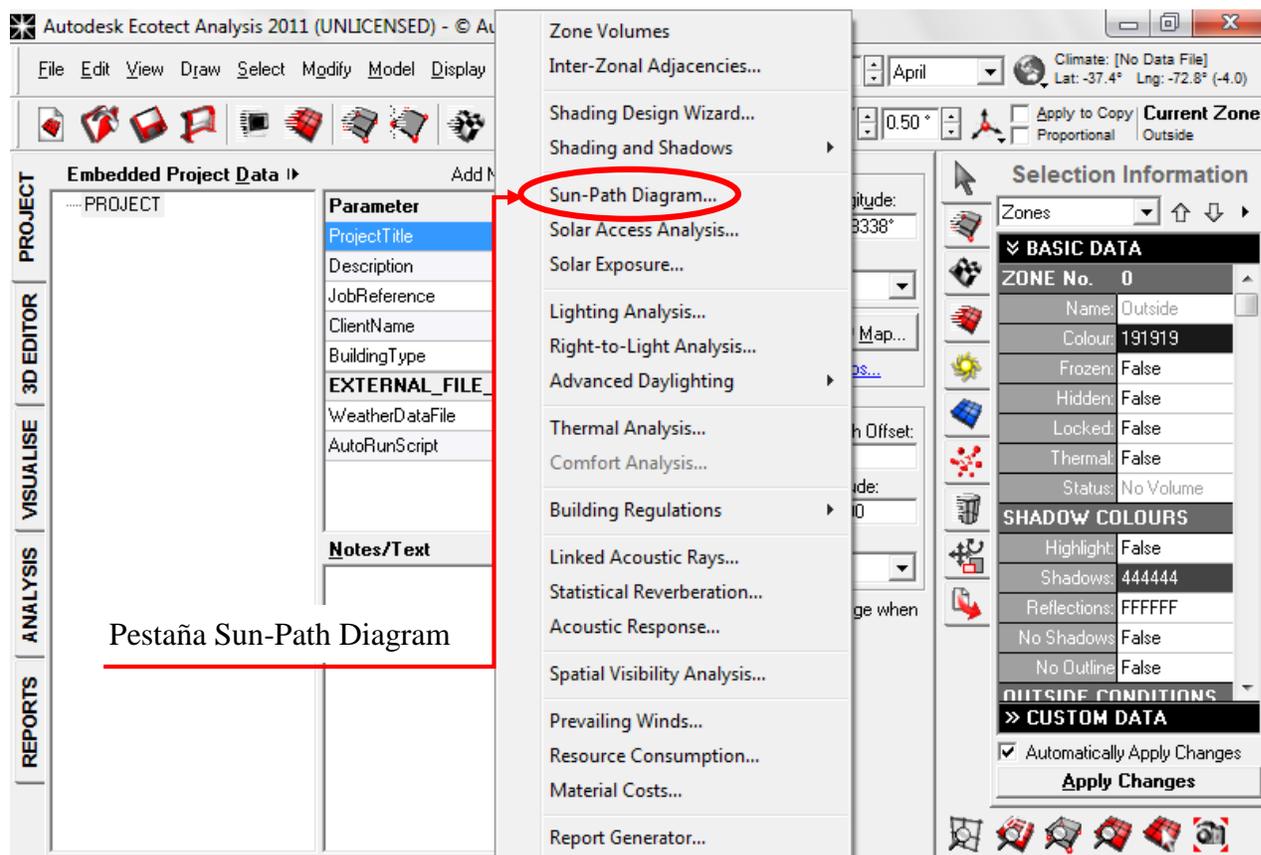


Figura A2: Obtención diagramas solares.

Fuente: Software Ecotect Analysis, 2011.

Paso 3: Estando ya dentro del menú “Sun-Path Diagram”, presionar sobre la pestaña “Orthographic” (Figura A3), para así lograr visualizar la proyección ortográfica necesaria para obtener los datos para fabricar la carta solar cilíndrica.

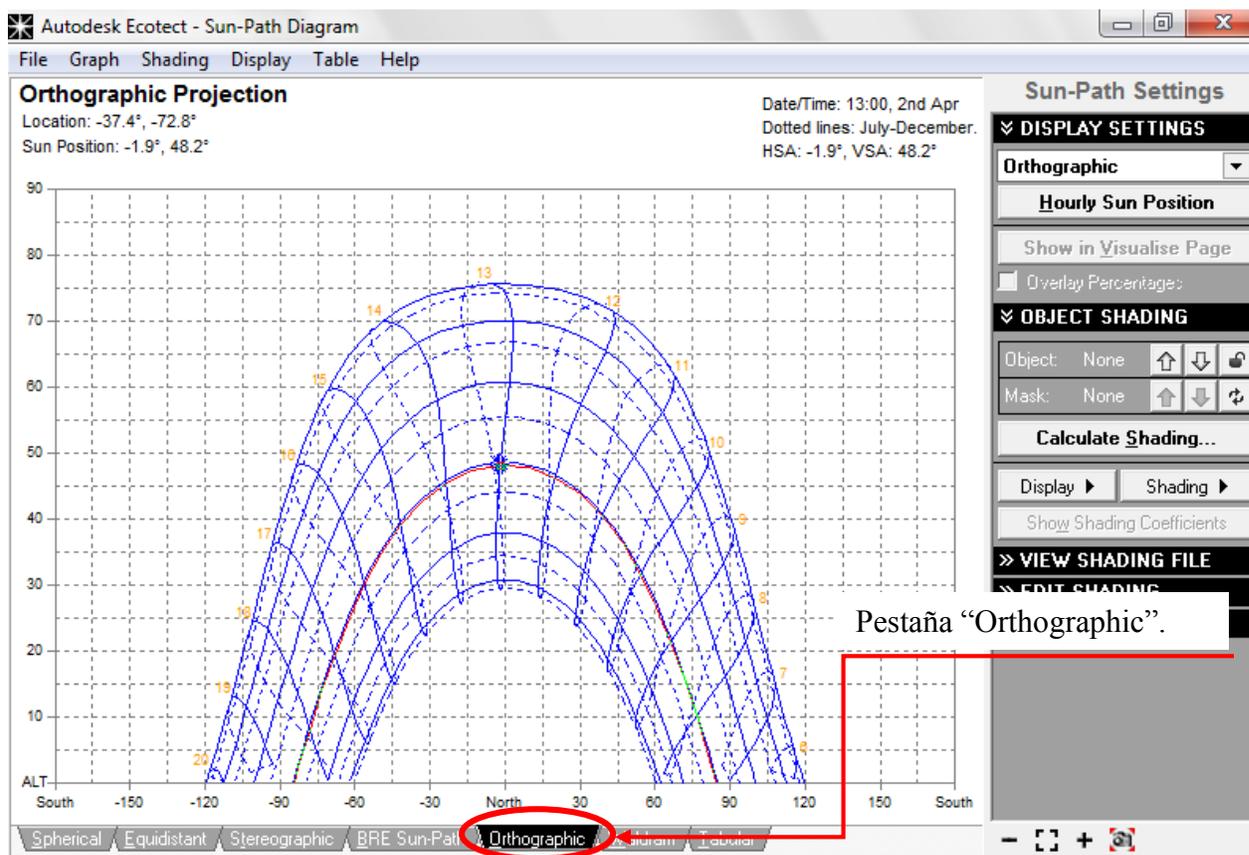


Figura A3: Proyección Ortográfica.

Fuente: Software Ecotect Analysis, 2011.

Paso 4: Dentro de la pestaña “Orthographic” (Figura A3) existe la posibilidad de mover las posiciones del Sol dentro del campo establecido en forma diaria. Una vez tenemos elegida nuestra posición nos dirigimos a la pestaña “Tabular” (Figura A4), la cual nos entregará los datos de hora local (hora civil), acimut y la altitud del Sol de un día completo, todo esto respecto a la ubicación establecida con anterioridad.

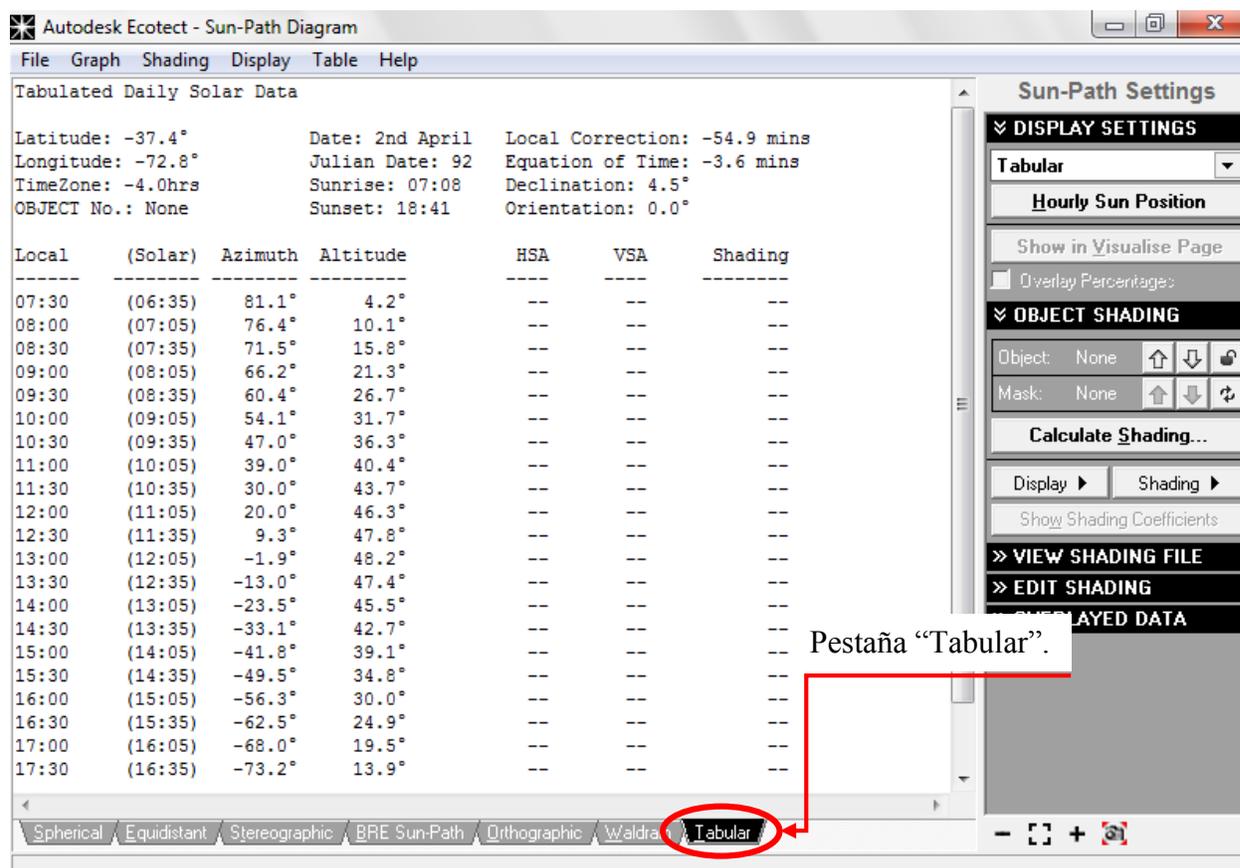


Figura A3: Proyección Ortográfica.

Fuente: Software Ecotect Analysis, 2011.

Los datos tabulados del movimiento del Sol se pueden exportar a un archivo Excel, con el que se podrá estudiar con mayor detalle el comportamiento que tiene éste respecto a cada día en particular.

ANEXO B. Obtención Perfil de Terreno.

El perfil de terreno se obtiene mediante un taquímetro marca Wild Heerbrugg (Figura B1), tomándose los datos cada 5°. La instalación del equipo se hizo a un costado de la calzada por la incapacidad de ponerlo en donde circulan los vehículos. La altura de instalación es de 1,10 m para así simular la altura de la visual de un conductor.



Figura B1: Taquímetro Wild Heerbrugg.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos obtenidos con el taquímetro se entregan grados centesimales (Tabla B1). Una vez exportados los datos a un archivo Excel, estos se convierten a grados sexagesimales (Tabla B2). Luego de lo anterior los datos son convertidos a una escala de conveniencia la que es este caso va de -180° a 180° (Tabla B3).

Tabla B1: Acimut y Altitud en grados Centesimales.

Fuente: Elaboración propia.

Acimut	Altitud	Acimut	Altitud	Acimut	Altitud	Acimut	Altitud
0	10,39	105	8,1	210	5,68	315	2,47
5	12,64	110	7,42	215	2,08	320	2,98
10	13,46	115	6,38	220	2,16	325	4,25
15	12,92	120	7,36	225	2,36	330	3,83
20	13,5	125	7,92	230	2,89	335	5,5
25	18,84	130	8,59	235	3,02	340	5,62
30	14,45	135	8,64	240	3,11	345	4,99
35	11,89	140	8,66	245	3,29	350	4,67
40	11,88	145	7,35	250	3,74	355	7,4
45	9,54	150	7,3	255	4,12	360	2,62
50	9,75	155	8,33	260	3,07	365	7,56
55	12,54	160	9,14	265	2,41	370	6,44
60	12,23	165	7,45	270	2,18	375	10,32
65	7,09	170	4,36	275	2,59	380	23,24
70	8,95	175	4,29	280	3,22	385	25,52
75	6,64	180	2,95	285	3,42	390	15,02
80	8,33	185	2,88	290	3,36	395	8,24
85	8,38	190	4,15	295	2,86	400	10,39
90	7,96	195	3,88	300	2,78		
95	8,56	200	2,59	305	3,16		
100	8,84	205	5,17	310	2,86		

Tabla B2: Acimut y Altitud en grados Centesimales.

Fuente: Elaboración propia.

Acimut	Altitud	Acimut	Altitud	Acimut	Altitud	Acimut	Altitud
0	9,351	94,5	7,29	189	5,112	283,5	2,223
4,5	11,376	99	6,678	193,5	1,872	288	2,682
9	12,114	103,5	5,742	198	1,944	292,5	3,825
13,5	11,628	108	6,624	202,5	2,124	297	3,447
18	12,15	112,5	7,128	207	2,601	301,5	4,95
22,5	16,956	117	7,731	211,5	2,718	306	5,058
27	13,005	121,5	7,776	216	2,799	310,5	4,491
31,5	10,701	126	7,794	220,5	2,961	315	4,203
36	10,692	130,5	6,615	225	3,366	319,5	6,66
40,5	8,586	135	6,57	229,5	3,708	324	2,358
45	8,775	139,5	7,497	234	2,763	328,5	6,804
49,5	11,286	144	8,226	238,5	2,169	333	5,796
54	11,007	148,5	6,705	243	1,962	337,5	9,288
58,5	6,381	153	3,924	247,5	2,331	342	20,916
63	8,055	157,5	3,861	252	2,898	346,5	22,968
67,5	5,976	162	2,655	256,5	3,078	351	13,518
72	7,497	166,5	2,592	261	3,024	355,5	7,416
76,5	7,542	171	3,735	265,5	2,574	360	9,351
81	7,164	175,5	3,492	270	2,502		
85,5	7,704	180	2,331	274,5	2,844		
90	7,956	184,5	4,653	279	2,574		

Tabla B3: Acimut y Altitud en grados Centesimales en escala -180° a 180°.

Fuente: Elaboración propia.

Acimut	Altitud	Acimut	Altitud	Acimut	Altitud	Acimut	Altitud
-180	2,331	-85,5	2,844	9	12,114	103,5	5,742
-175,5	4,653	-81	2,574	13,5	11,628	108	6,624
-171	5,112	-76,5	2,223	18	12,15	112,5	7,128
-166,5	1,872	-72	2,682	22,5	16,956	117	7,731
-162	1,944	-67,5	3,825	27	13,005	121,5	7,776
-157,5	2,124	-63	3,447	31,5	10,701	126	7,794
-153	2,601	-58,5	4,95	36	10,692	130,5	6,615
-148,5	2,718	-54	5,058	40,5	8,586	135	6,57
-144	2,799	-49,5	4,491	45	8,775	139,5	7,497
-139,5	2,961	-45	4,203	49,5	11,286	144	8,226
-135	3,366	-40,5	6,66	54	11,007	148,5	6,705
-130,5	3,708	-36	2,358	58,5	6,381	153	3,924
-126	2,763	-31,5	6,804	63	8,055	157,5	3,861
-121,5	2,169	-27	5,796	67,5	5,976	162	2,655
-117	1,962	-22,5	9,288	72	7,497	166,5	2,592
-112,5	2,331	-18	20,916	76,5	7,542	171	3,735
-108	2,898	-13,5	22,968	81	7,164	175,5	3,492
-103,5	3,078	-9	13,518	85,5	7,704	180	2,331
-99	3,024	-4,5	7,416	90	7,956		
-94,5	2,574	0	9,351	94,5	7,29		
-90	2,502	4,5	11,376	99	6,678		