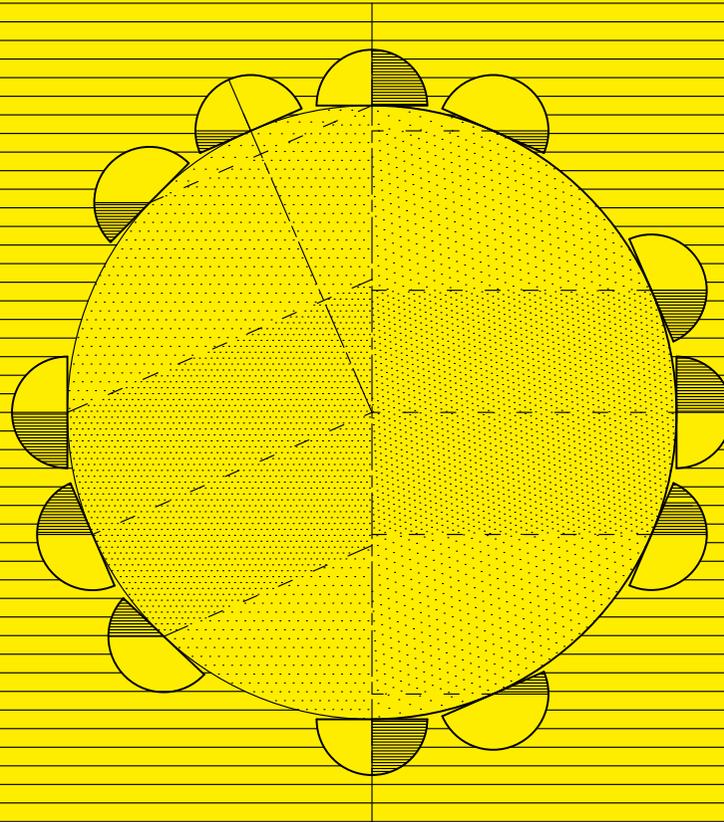
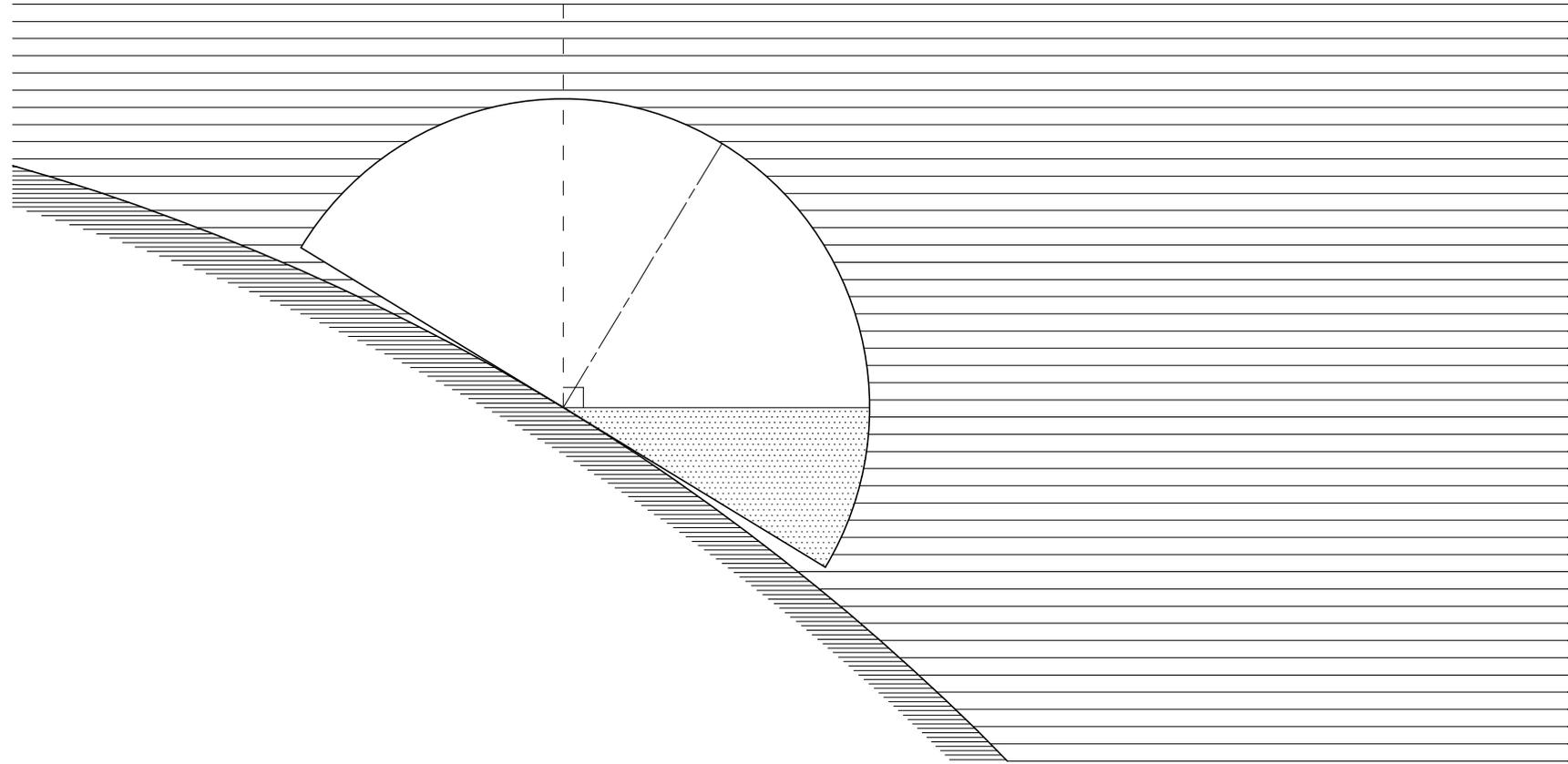


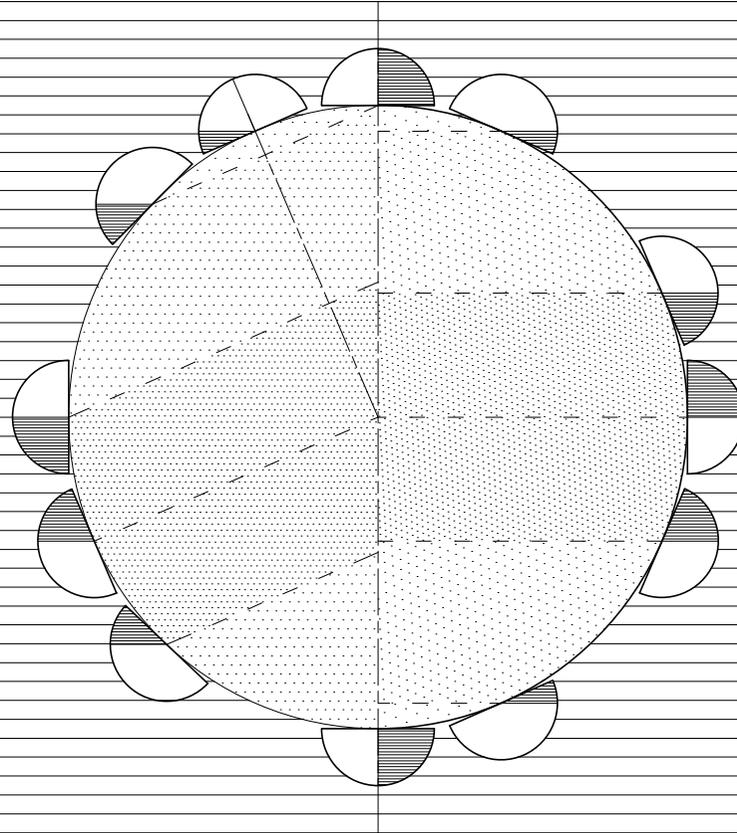
Cálculo Solar para la Arquitectura



José Leyva
Domingo Alás



CÁLCULO SOLAR PARA LA ARQUITECTURA



José Leyva
Domingo Alás

Fecha de publicación: **30 de noviembre de 2023**

Autoridades

Ing. Saúl Lara, Mg. – Canciller

Ing. Luis David Prieto, PhD – Rector

Mgtr. Nora Oleas, PhD – Vicerrectora Académica y de vinculación con la sociedad

Ing. Janio Jadán, PhD – Vicerrector de Investigación

Ing. Aidé Naranjo, Mg. – Vicerrectora Administrativa y de Aseguramiento de la Calidad

© **Autor: José Leyva Guzmán (1) & Domingo Alás Rosell (2)**

(1) Facultad de Arquitectura y Construcción (FARCO), Universidad Indoamérica, Av.

Machala y Sabanilla, Quito, Ecuador. Correo: joseleyva@uti.edu.ec

(2) Empresa de Diseño e Ingeniería Las Tunas (CREVER). Avenida 30 de Noviembre S/N

Altos BANDEC, Las Tunas, Cuba. Correo: dalas1951@gmail.com

ISBN: 978-9942-821-83-6 / Derecho de autor: QUI-064932

Revisado y aprobado para su publicación:

Comité Editorial de la Universidad Indoamérica (Quito, Ecuador)

Revisores:

Mg. Fernando Hinojosa Neira

(Docente investigador de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador)

Mg. Franklin Edmundo Molina Jiménez

(Docente Agregado 1 de Universidad Central del Ecuador).

Editor: Ing. Hugo Arias Flores, MBA.

Editorial de la Universidad Tecnológica Indoamérica. Quito – Ecuador.



Queda rigurosamente prohibida la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la fotocopia y el tratamiento informático, sin autorización escrita del titular del Copyright, bajo las sanciones previstas por las leyes.

Para citar este libro: Leyva Guzmán, J. R., & Alás Rosell, D. (2023). *Cálculo Solar para la Arquitectura* (H. Arias Flores, Ed.; 1st ed., Vol. 1). Editorial de la Universidad Tecnológica Indoamérica. Quito – Ecuador.



Universidad
Indoamérica

AUTORES



José Ramón Leyva Guzmán

Es docente, tutor e investigador de diseño, arquitectura, patrimonio y sostenibilidad en la Universidad Tecnológica Indoamérica de la ciudad de Quito. Graduado de arquitecto en la Universidad de Camagüey en la ciudad de Camagüey en Cuba, obteniendo el Máster en Rehabilitación y Conservación de Centros Históricos del Patrimonio Edificado en el mismo centro de altos estudios. Actualmente es docente en la Universidad Tecnológica Indoamérica en la ciudad de Quito en Ecuador. Desde su formación como arquitecto ha trabajado en diferentes países como Cuba, Venezuela, Angola y Ecuador, su labor como proyectista y académico le ha permitido tener una visión completa en las que abarcan temas como sostenibilidad, producción arquitectónica y la investigación.



Domingo Antonio Alás Rosell

Es graduado de Arquitecto (1980) en la Universidad de Oriente. Profesor universitario, constructor, proyectista arquitectónico, asesor para las construcciones del Ministro de la Construcción en Granada y Primer Ministro de Timor Oriental. Tutor de trabajos de diploma en universidades cubanas en las especialidades: Arquitectura, Ingeniería Civil e industrial, Historia del Arte y Física. Ha incursionado con resultados positivos en temas como: Arquitectura solar aplicando cálculos de alta precisión, superficies alabeadas de doble curvatura, mallas espaciales, arcos catenarios y ferrocemento. Vinculó la Física con la Arquitectura en varios proyectos. Creador del modelo matemático para la programación de la aplicación Dig-5 para el cálculo solar preciso. Participante en eventos técnicos nacionales e internacionales, ganador de premios como el de Calidad de Diseño año 2012.

ÍNDICE

I	PRÓLOGO	63	PARTE 3. EJEMPLOS DE CÁLCULOS
II	AGRADECIMIENTOS	63	Ejercicio 1
		71	Ejercicio 2
III	DEDICATORIA	93	PARTE 4. GRÁFICOS SOLARES
IV	RESUMEN	93	Tipos de diagramas y gráficos solares
V	ABSTRACT	95	Proyección esférica u ortogonal
		96	Proyección cilíndrica
		96	Proyección equidistante o polar
		97	Proyección estereográfica
		98	Proyección de ejes cartesianos
		98	Sombrigramas solares o carta solares-sombras
1	INTRODUCCIÓN	101	Diagramas solares para las latitudes notables
	¿CÓMO Y POR QUÉ SURGE ESTE MÉTODO DE CÁLCULO SOLAR PARA LA ARQUITECTURA?	106	Ecuador terrestre (0°)
9		108	Trópico de Cáncer (+23,44°)
		110	Círculo Polar Ártico (+66,56°)
13	ANTECEDENTES	112	Polo Norte (+90°)
14	Gran templo Abu Simbel	114	Trópico de Capricornio (-23,44°)
16	Templo El Castillo en Chichen Itza	116	Círculo Polar Antártico (-66,56°)
17	Capilla Notre Dame du Haut Romchamp	118	Polo Sur (-90°)
18	Sun Tunnels	123	PARTE 5. OBRAS DE ARQUITECTURA QUE IMPLEMENTAN EFECTOS SOLARES
19	Punto Flotante	127	Plaza Martiana de Las Tunas
23	PARTE 1. APUNTES SOBRE CINEMÁTICA SOLAR	139	Memorial Caimito de Hanábana
24	El Sol	151	APUNTES FINALES
25	La Tierra	154	Bibliografía
26	Movimiento de rotación sobre su eje		
28	Movimiento de traslación alrededor del Sol		
35	PARTE 2. MOVIMIENTOS APARENTES DEL SOL		
35	Consideraciones y términos		
41	Sistemas ecuatorial y horizontal de coordenadas celestes		
42	Coordenadas del sistema ecuatorial u horario		
50	Sistema de coordenadas horizontales		
55	Corrección horaria		

La realidad supera a la ficción

Era impresionante la intensidad de la excavación nazi en medio de las secas arenas del desierto egipcio. La gran cantidad de trabajadores que se movían con premura a pesar del sol implacable reflejaba la importancia de su objetivo: encontrar el “Pozo de las almas”, y en su interior, el mítico Arca de la Alianza.

Pero el doctor Jones sabía que excavaban en el lugar equivocado... Él se había apoderado recientemente del cabezal del “Bastón de Ra”, un medallón de oro con un cristal color rubí intenso en el centro, que puesto en la “Sala de mapas de Tanis” donde había una maqueta de la antigua ciudad egipcia, y al darle el sol en el centro a las 9 de la mañana, sus rayos revelarían la ubicación exacta del “Pozo de las almas”, y dentro, el ansiado Arca.

Así mismo a muchos kilómetros de ahí, el sol caía intensamente sobre una plaza en medio de la ciudad de las Tunas, al oriente de la isla de Cuba. Es 19 de mayo, y un grupo de curiosos turistas se interna en la plaza hasta encontrar una estrella que nace del suelo con cinco pétalos en forma de paraboloides, asomándose en uno de ellos el rostro del héroe cubano José Martí. Los visitantes esperan a que sean las 2:30 de la tarde pues a esa hora el sol reflejará uno de sus rayos sobre un reflector cuya orientación proyectará un cono de luz sobre el rostro del héroe, conmemorando y honrando su vida al recordar el día y hora de su muerte.

Aunque el primer evento es producto de la imaginación de los creadores de la película “Indiana Jones y el Arca perdida”, el segundo lo vuelve posible al describir lo que ocurre cada año a la misma hora en la plaza Martiana de las Tunas. Son ejemplos de cómo el sol marca una geometría cósmica cíclicamente cambiante en un vaivén de luz que baña todos los objetos de la superficie terrestre y de una manera que podemos predecir.

Símbolo y humanidad

El Sol, sus movimientos por la bóveda celeste y la manera en que sus rayos caen sobre la superficie terrestre han sido una fascinación de la humanidad que se registra profundamente en la historia en espacios y tiempos totalmente separados como los dos eventos mencionados anteriormente. Ha sido considerado desde los inicios de la humanidad como la representación misma de un dios, una fuente de vida que separa los espacios del día, el trabajo y la actividad, de la noche, el resguardo y el descanso, y que representa la esperanza de ver un nuevo amanecer.

El libro del Génesis describe que una de las primeras obras de Dios para crear el universo fue ordenar la creación de la luz. De igual forma muchos mitos e historias de diferentes culturas a lo largo del tiempo han destacado la importancia de conectarse con la luz. Las ruinas de Stonehenge en Inglaterra, construidas hace más de 5000 años, presentan una geometría orientada a enmarcar el solsticio de junio. En las ruinas de Chiche Itzá en México, durante los equinoccios de marzo y septiembre podremos ver al sol dibujar una serpiente

bajando por las escaleras de la pirámide. En las pirámides de Guiza en Egipto encontraremos una alineación con las estrellas del cinturón de Orión, revelando también esa obsesión humana por conectar lo terrestre con lo celestial. Estos y muchos objetos más diseñados a lo largo de la historia de la humanidad, nos heredan un conocimiento que nos ha llevado a diseñar y construir objetos habitables que dialogan con el cielo, el sol y las estrellas.

Vida en la tierra

Nuestra relación con el Sol es mucho más esencial que exaltar su poder simbólico. El Sol es la fuente principal de energía de este planeta. La luz que emite recorre el espacio como una onda electromagnética que al tocar los objetos de la tierra los calienta. Su luz transforma el hielo en agua, los ríos en nubes, las tormentas en lagos y mares.

La inclinación de la tierra unida a la geometría que marca la incidencia de los rayos del Sol sobre su superficie determina el cambio de las estaciones y afectan las circulaciones del aire. Con el pasar de cada estación la Tierra respira, los bosques del Norte crecen y reverdecen durante la primavera y el verano absorbiendo CO₂, para luego liberarlo al perder sus hojas en otoño e invierno en un largo respiro de 365 días. La Tierra es así también un ser vivo que respira al ritmo que le marca el Sol.

Mapas de clasificación climática como el Köppen-Geiger nos muestran como la vida se ha extendido a lo largo del planeta mediante la adaptación a las diferentes condiciones climáticas y así mismo los humanos hemos desarrollado diferentes refugios de arquitectura vernácula que pudieran generar en su interior un confort superior al de la intemperie

al aprovechar las condiciones de cada lugar para garantizar nuestra supervivencia.

Refugio y lugar

Muchos de los grandes edificios de la historia y sus arquitectos rescatan esa conexión de la cúpula celeste con el suelo que pisamos, y han dejado claro que la buena arquitectura siempre se relaciona con su contexto. Todo lugar tiene una preexistencia, una topografía, recursos naturales, clima y una manera diferente de ser observado desde el Sol, que pueden ser inteligentemente aprovechados para generar bienestar en los espacios que habitamos.

Métodos variados de análisis climático como la tabla de Givoni nos indican que la temperatura, humedad, dirección del viento y su velocidad, las horas sol y sus diferentes ángulos de incidencia a lo largo del año, afectan enormemente el confort que percibimos dentro de los edificios y nuestro bienestar.

Hemos superado de manera exponencial el mito de Prometeo volviéndonos casi dioses capaces de controlar el clima dentro de nuestros edificios, creando una segunda capa de piel con la ropa y una tercera capa de piel con el edificio. Somos ahora capaces de generar brisas, taparnos del sol calculando con precisión sus ángulos de incidencia, hacer que un espacio sea más frío o más caliente de lo que su ambiente le permitiría, controlando los flujos de aire para nuestro confort.

Sin embargo, hemos sido víctimas de nuestro propio ego e incredulidad al creer que debíamos dominar la naturaleza, dañándola con consecuencias que amenazan hoy con nuestra supervivencia. Nos darnos cuenta ahora que

somos parte del planeta y si no actuamos en sinergia con sus fuerzas estamos declarando nuestra propia extinción.

Amenaza

Como planeta enfrentamos un reto de cambio climático en el que los fenómenos naturales que nos perjudican se vuelven más violentos. Una parte importante de enfrentarlo está en la manera en que creamos edificios y ciudades entendidos como el hábitat del ser humano.

Los sistemas y materiales de confort climático artificiales actuales tienen un alto impacto ambiental en su fabricación, transporte y generación de la energía que necesitan. Muchos serían innecesarios si lográramos aprovechar eficientemente los recursos y energías gratuitas del lugar para lograr una arquitectura de alto desempeño que logre un mayor confort y bienestar, aprovechando el conocimiento ancestral de la arquitectura vernácula complementado con las tecnologías modernas.

Esperanza y acción

Este libro es una herramienta de cálculo para aprovechar la energía gratuita del Sol con precisión, y orientar de manera simple pero significativa al objeto arquitectónico. Nuestro hábitat debe ser una extensión, adaptación y complemento de los ecosistemas naturales para aprovechar sus recursos a nuestro favor sin agotarlos, dañarlos ni desperdiciarlos. Libros como el presente nos ayudarán a reconciliar el diálogo esencial que siempre existirá entre una arquitectura deseable y las energías del lugar, en este caso la más abundante: el Sol.

Arq. Sebastián Alvarado Grugiel, MS.
San José, 25 de agosto 2022

Este libro es el resultado del esfuerzo paciente de integrantes de dos generaciones que aman la arquitectura y la astronomía.

José Leyva:

Agradezco, primeramente, a Domingo Alás, pues este tema le pertenece por entero; gracias a su labor fecunda, al amor por la arquitectura y el Sol, y, sobre todo, por su aporte en mi formación profesional.

A mis profesores, colegas, amigos y familiares, gracias a todos los que han confiado en mí; en especial a mi tío Federico Smith.

A mi esposa, mi amor, ¡gracias por todo!

Domingo Alás:

A José Ramón, por levantarme del banco y ponerme a jugar en tan preciosa liga.

AGRADECIMIENTOS

A mi hijo Daniel Leyva, que la luz del Sol te guíe con dignidad y decoro... A mi esposa Elena Sánchez, por todo su apoyo, por su entrega y por su amor... A mis queridos padres estén donde estén...

José Leyva

A Enith, mi esposa, que nunca ha dejado de apoyarme, a Selenita, Pedrín y Zabeth, mis hijos, fuentes de inspiración para todo lo que hago; a mis colegas arquitectos.

Domingo Alás

DEDICATORIA

Día a día, el Sol, en su labor diaria de darnos calor y luz, es aprovechado por el hombre en función de mejorar su vida. El Diseño Arquitectónico exige de un conocimiento preciso y profundo de las sucesivas posiciones del astro rey para lograr resultados con garantía, conocimientos que necesitan ser verdaderamente precisos.

Con este libro, que ponemos a su consideración, se exponen conocimientos tantos generales, como específicos para comprender, mediante un método de cálculo creado al efecto y complementado con gráficos, esquemas, dibujos y textos, los fenómenos solares que inciden en el buen diseño arquitectónico, así como para determinar con precisión las coordenadas solares de cualquier sitio de la Tierra en cualquier instante del año.

El método de cálculo solar elaborado por el arquitecto Domingo Antonio Alás Rosell tiene como respaldo de su eficacia las diversas obras arquitectónicas realizadas por el autor del método. En estas edificaciones se puede evidenciar día a día como la luz y las sombras, a consecuencia del complejo movimiento del Sol por nuestra bóveda celeste, atemperan y enaltecen las superficies arquitectónicas mediante su recorrido previamente calculado.

Este texto contiene información de inestimable valor como consulta y guía para el cálculo posicional del Sol. El mismo contiene, como aspecto novedoso, un software para la realización de estos cálculos, que servirán para que los arquitectos realicen proyectos de alto nivel de diseño con relación a la incidencia solar y al logro de efectos místicos en la arquitectura.

RESUMEN

INTRODUCCIÓN



INTRODUCCIÓN

Stonehenge, Reino Unido.

INTRODUCCIÓN

Muchos arquitectos desde la antigüedad hasta nuestros días han sentido la necesidad de que el Sol forme parte de sus obras; su presencia ha sido vital y simbólica para el enriquecimiento del espíritu de los hombres, logrando así, que la luminosidad y la divinidad se unieran en un mismo objetivo (Shepperson, 2009).

El tratar de incorporar la iluminación solar con carácter simbólico puede ser un proceso de una complejidad considerable. Nuestros antepasados se auxiliaban habitualmente de la observación para poder realizar efectos solares en sus obras arquitectónicas; conscientes de dichas restricciones no obraron de manera pretenciosa, por lo que, en general los resultados fueron limitados.

Este libro tiene como principal objetivo presentar una secuencia de cálculo elaborada por el arquitecto Domingo Alás (Bárbaro & Alás, 2005) que permite determinar las coordenadas solares y posición de la sombra de un punto dado para cualquier fecha y latitud de la Tierra (Perez Orozco & Alás Verdecia, 2015). Por lo que, este texto servirá para dotar a cualquier arquitecto o persona interesada en el tema, de las herramientas necesarias para diseñar los espacios arquitectónicos y urbanos con precisión utilizando la iluminación solar con fines simbólicos y sostenibles (Wachberger & Wachberger, 1984).

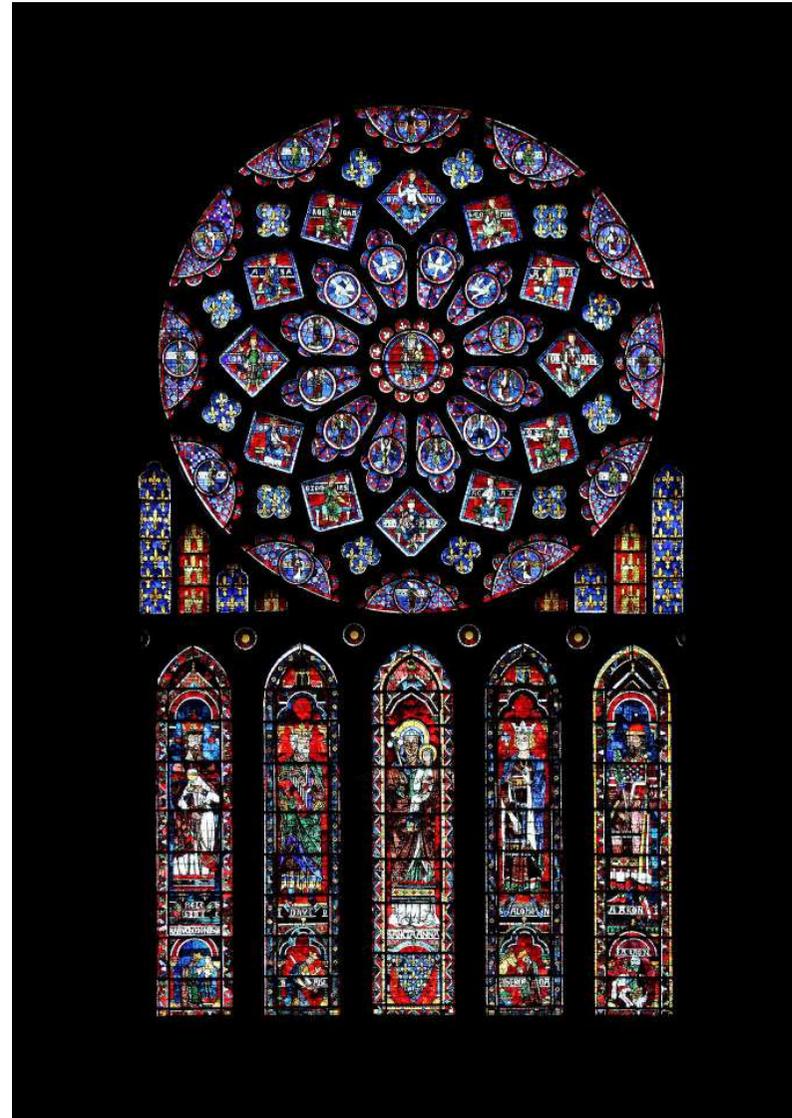


Figura 1. Vitral gótico. En la Edad Media existía un especial interés por el uso de la iluminación solar tamizada por los vitrales de colores.
Fuente: Pixabay.

De igual forma, el presente libro expone de manera asequible y amena todos los temas de teoría básica imprescindible para comprender la cinemática del movimiento solar aparente alrededor de la Tierra (Ver en Parte 2. Movimientos aparentes del Sol). Auxiliándose de gráficos, esquemas e imágenes que ilustran los contenidos analizados. Todos estos elementos indispensables para poder comprender el posicionamiento solar fueron seleccionados de forma cuidadosa y con alto rigor científico, realizando un estudio profundo de cómo han evolucionado estos métodos de cálculos. El estudio también cuenta con el criterio y los proyectos realizados por el arquitecto Domingo Alás Rosell (Labrador Herrera, 2019), del que se incluye algunas obras, así como el análisis que se llevó a cabo para poder lograr eficientemente los objetivos luminosos simbólicos propuestos por dicho profesional. Probando así la veracidad de su método de cálculo que aquí se pone a su disposición (Bárbaro & Alás, 2005) (Perez Orozco & Alás Verdecia, 2015).



Figura 2. Plaza Martiana, obra del arquitecto Domingo Alás Rosell.

Además del método analítico de cálculo presente en este texto, existen otros métodos usados como gráficos solares, sombrigramas y cartas solares, aunque todos estos no permiten diseños de precisión (Alemany, 1986; Lacomba et al., 1991; Marsh, 2021b; Olgyay, 2008). Los datos que aportan tales medios no dan los elementos necesarios para ello. Por ejemplo, los sombrigramas y gráficos solares están dados para fechas cercanas a los días 21 de cada mes, y tienen la dificultad adicional, a los errores que se cometen por apreciación e interpolación. Así mismo, las tablas solares que respaldan estos gráficos dan los valores cada una hora y con precisión de grados y están referidos a puntos específicos de la geografía de una región o un país (Olgyay, 2008). Evidentemente, realizar un proyecto de precisión en un punto diferente a la posición que refieren estos gráficos y tablas es imposible por la falta de datos, por un lado, y por otro, los inevitables errores que se cometen por diferentes causas. Por lo que se puede asegurar que los métodos antes expuestos impiden la seguridad y la garantía del diseño.

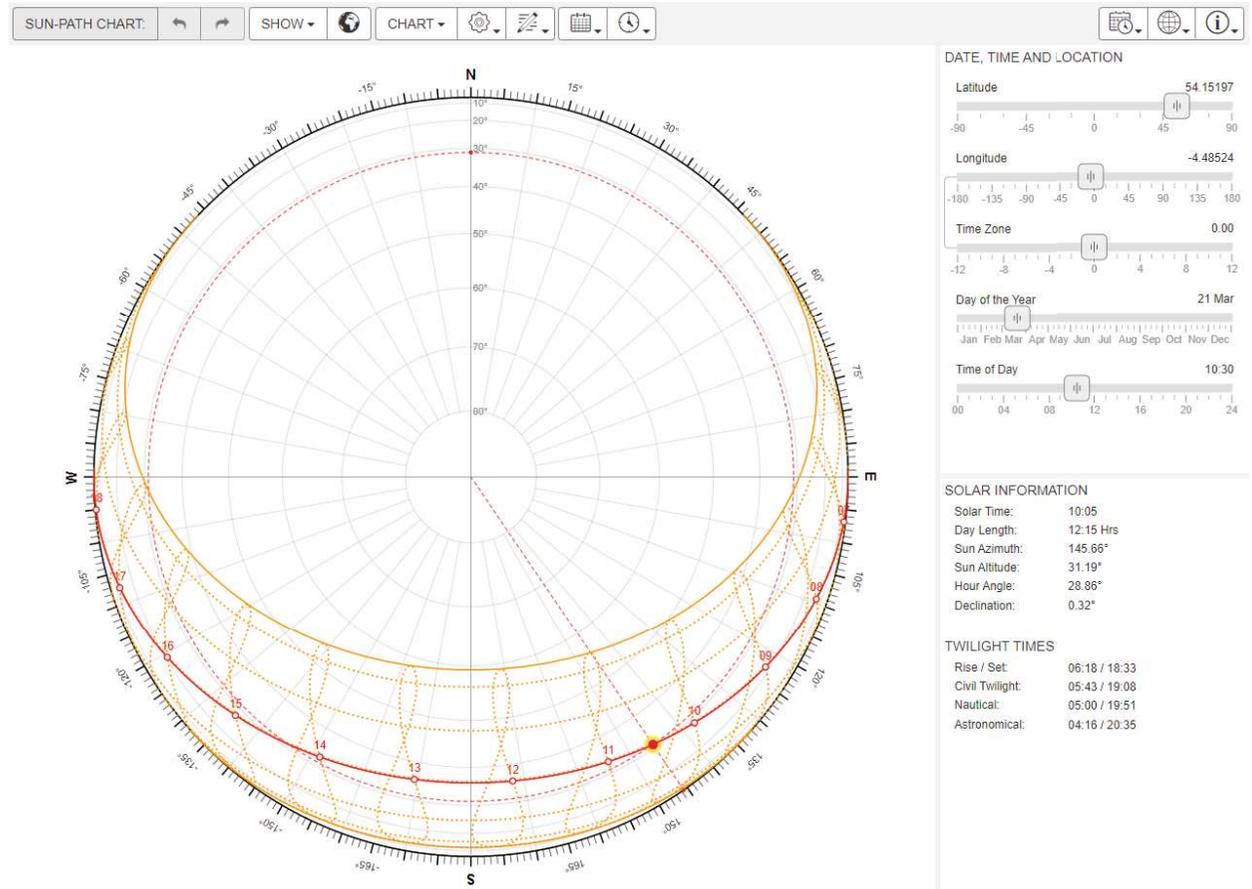


Figura 3. Página Web que genera los gráficos solares.

Fuente: <https://drajmarsh.bitbucket.io/sunpath2d.html> Por PHD. Andrew Marsh.

Algo similar ocurre con los métodos experimentales, tanto de campo como de laboratorio. En los métodos de campo, a pesar de obtenerse parámetros de forma directa y precisa, requiere de mucho tiempo para hacer las observaciones y compilar los datos; de igual manera estos pueden ser afectados por factores naturales ajenos a nosotros, fundamentalmente los fenómenos meteorológicos. Es pertinente indicar que los métodos experimentales de campo son importantes para corroborar los cálculos y datos obtenidos con métodos analíticos y gráficos. Por otro lado, los métodos experimentales de laboratorio (Figura. 4) son ideales para realizar estudios de arquitectura de carácter académico o para comprobar soluciones arquitectónicas, pero al igual que los métodos de campo, son ineficaces por tratarse de trabajos con maquetas y artefactos que pueden contener errores en su fabricación, pero sobre todo porque resultaría más largo y costoso que usar un método eficiente de cálculo (betanit.com, 2021; Ezpeleta Arenaza & Ruiz Larrea, 1997; Fernandes & GRala da Cunha, 2011; Herrmann, 2020; Leyva Guzmán & Villacís Ormaza, 2022; Ortiz García, 2012b; Sánchez Nava, 2015).

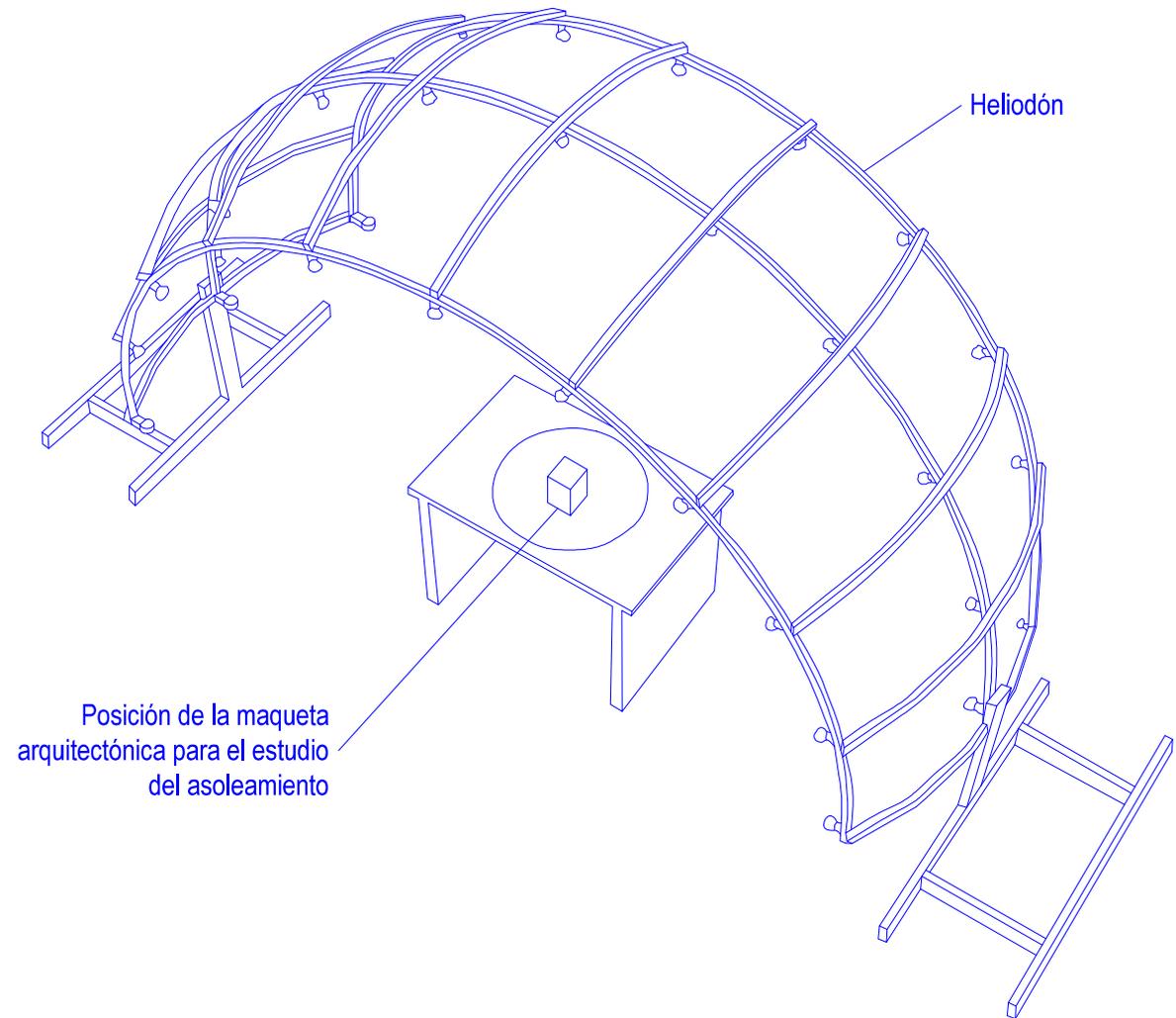


Figura 4. La imagen muestra el uso del Heliodón para determinar el asoleamiento en la arquitectura.
Fuente: Esquema elaborado en base a (Universidad, 2011)

Actualmente existen muchos software que proporcionan de alguna manera visualizaciones de los resultados de diseño con las condiciones solares para fechas y horas específicas (Benoit Beckers, 2006; cercaliain nexusgeografics, 2021; De la Paz Pérez, 2012; Gonzalo Besuievsky, 2018; Marsh, 2021b; Perez Orozco, 2015; Sun Path Chart Program, 2016), pero dichas aplicaciones tienen la desventaja de que no brindan un resultado exacto, solo se limitan a proyectar las sombras sin tener en cuenta aspectos como el atraso o adelanto constante que tiene el Sol en su recorrido aparente anual; por lo que, estas herramientas también limitan el producto para cuando la propuesta arquitectónica aspira a brindar un resultado preciso (Marsh & Stravoravdis, 2017; Marsh & Thoo, 2016). Los softwares que proporcionan un resultado más preciso no están en función de la arquitectura, por lo que se dificulta su uso en el diseño de edificaciones (Delgado Orellana & Orellana Samaniego, 2015).

Adicionalmente, con el objetivo de captar la atención del lector y hacer más amena la lectura de los densos capítulos teóricos, se incluyen los apartados “¿Sabías que?” Estos son pequeños recortes informativos que complementan, en muchos casos, el contenido teórico y logran de forma didáctica y entretenida transmitir temas afines con el texto.



Figura 5. La imagen muestra la piedra tallada conocida como Intihuatana, utilizada por los incas en Machu Picchu para estudiar el Sol.

Fuente: “Intihuatana en Machu Picchu”, de Alesegura tiene licencia CC BY4.0.

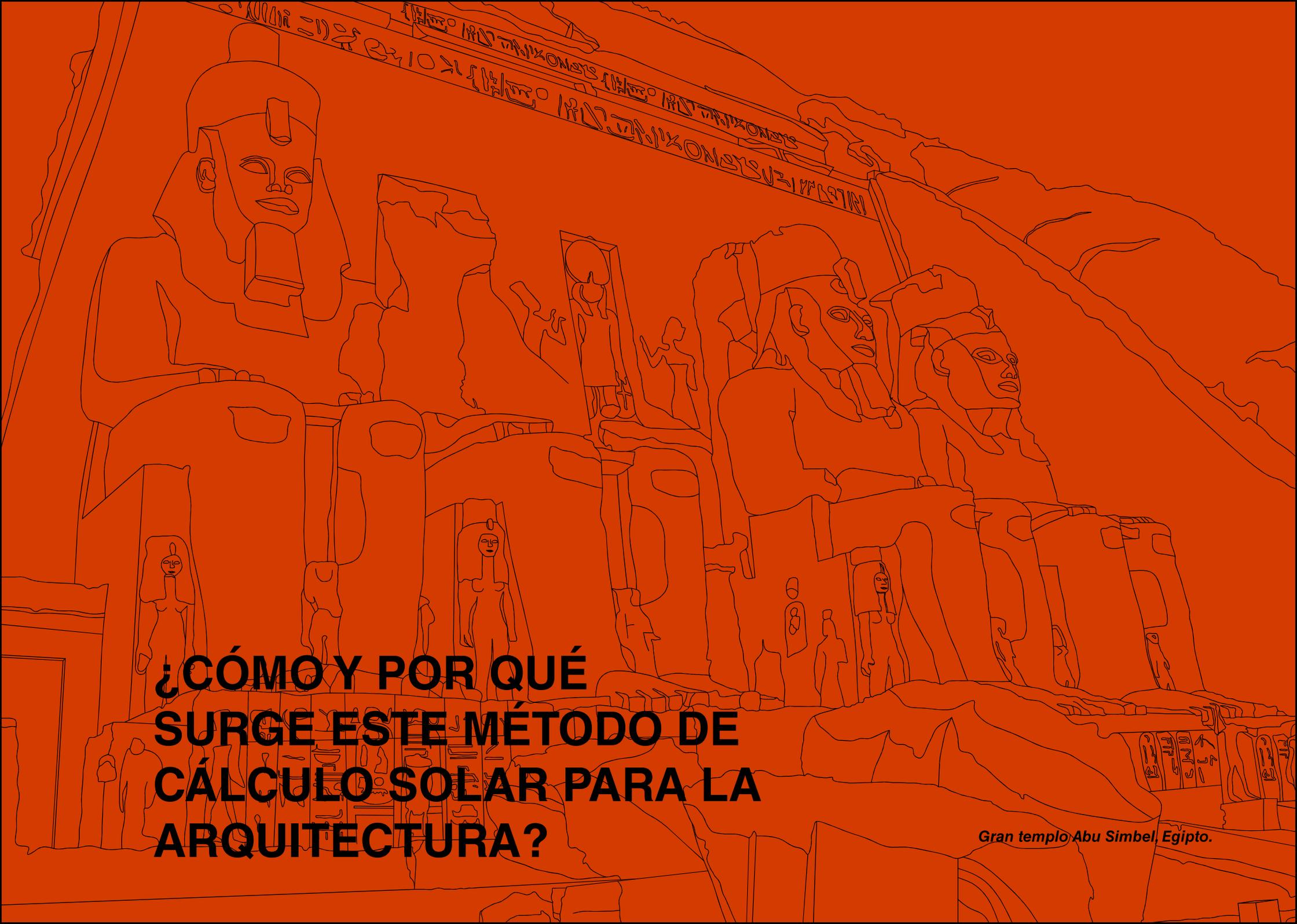
De esta manera se pone a consideración del interesado una mezcla apasionante entre la más antigua de todas las ciencias: “La Astronomía”, con la primera de todas las artes “La Arquitectura”; obteniendo una mezcla seductora, capaz de cautivar el espíritu de cualquier ser humano, auxiliado de una visión moderna y actualizada en parte científica y en parte poética; donde la iluminación sea su objetivo físico y simbólico.

Para poder explicar todo el contenido del cálculo del posicionamiento solar, fue necesario dividir el texto en cinco partes que explican toda la teoría, además de los antecedentes y las conclusiones. Los antecedentes exponen una selección de obras de arquitectura que aplican la iluminación solar con un enfoque simbólico, desde las primeras civilizaciones hasta el Siglo XX; la Parte 1 “Apuntes sobre cinemática solar”, describe como realmente es la interacción de la Tierra y el Sol en el espacio, sus movimientos reales y cómo nos afectan; en la Parte 2 “Movimientos aparentes del Sol”, se analizan las trayectorias solares aparentes, en la que se supone a la Tierra fija y el Sol se traslada en la bóveda celeste a lo largo de un año; los ejemplos de cálculos para poder comprender la teoría de una manera práctica se brindan en la Parte 3 “Ejemplos de cálculos”; para poder aplicar los resultados obtenidos en los cálculos es necesario comprender los sistemas de proyecciones gráficas como se expone en la Parte 4 “Gráficos solares” donde

se explican las proyecciones solares y sombrigramas; la Parte 5 “Obras de arquitectura que implementan efectos”, trata de ejemplificar todo lo aprendido en las partes anteriores con la ayuda de obras de arquitectura del autor del método de cálculo, que logran efectos solares. Para finalizar se brindan las conclusiones del libro.

En todos los ejemplos que se mostrarán a continuación el Sol ha tomado un papel protagónico; aunque se deduce que el dominio de la iluminación solar es parcial, limitándose su efecto, debido al conocimiento incompleto; los arquitectos como ya se había explicado con anterioridad no poseen, por lo general, las herramientas necesarias para las especificidades del diseño. De manera que, incluso, en la actualidad, es extremadamente difícil para aquellos arquitectos que se proponen realizar proyectos con tales propósitos, dedicándole al tema mucho tiempo, lo que limita la variedad, la creatividad y la imaginación del proyecto final.

**¿CÓMO Y
POR QUÉ
SURGE
ESTE MÉTODO
DE CÁLCULO
SOLAR
PARA LA
ARQUITECTURA?**



**¿CÓMO Y POR QUÉ
SURGE ESTE MÉTODO DE
CÁLCULO SOLAR PARA LA
ARQUITECTURA?**

Gran templo Abu Simbel, Egipto.

¿CÓMO Y POR QUÉ SURGE ESTE MÉTODO DE CÁLCULO SOLAR PARA LA ARQUITECTURA?

Cuando estudiaba la Carrera de Arquitectura y recibí la asignatura de Física Ambiental que trataba sobre el control solar, el soleamiento, la iluminación natural y la ventilación; me llamó la atención que los estudios realizados referidos a la incidencia solar sobre las construcciones se limitaban a determinadas regiones de un país y aportaban una escueta cantidad de datos. Gráficos como los sombrigramas y otros artificios como las cajas solares y algunas tablas que, por lo limitado de los datos, eran insuficientes para hacer trabajos de alta precisión sobre todo si eran lugares alejados de aquellos en específicos para los que se habían hecho los estudios. En este contexto, me percaté que este era el resultado de un serio proceso de cálculo basado en ecuaciones de la Astronomía Solar, la trigonometría esférica, la trigonometría plana, la geometría y otras disciplinas a las que les “eché garra” y, me dediqué a buscar un método que me sirviera para lograr los datos solares necesarios que permitieran para cualquier lugar de La Tierra y en cualquier instante del año para crear la Arquitectura con toda libertad en cuanto a orientación solar se refiere.

El problema estaba planteado: si se conoce las coordenadas solares (acimut solar y altura solar) para un momento dado en una fecha y en una ubicación específica puedo saber cómo inciden los rayos solares en un objeto dado y deducir la longitud de su sombra y su dirección con lo que sería muy fácil lograr diseños muy interesantes.

Lo que no sabía era que, para poder obtener esos dos parámetros que son con los que un arquitecto puede diseñar una obra específica o un efecto dado, tenía que resolver previamente un rosario de ecuaciones que, en determinados casos, puede llegar a unas dieciséis, algunas tan complicadas y tediosas como la Ecuación de Tiempo, la Declinación Solar y el Ángulo Horario; pero a pesar de ello me decidí a indagar y con la ayuda de algunos conocimientos ligeros de Astronomía que ya poseía por haber estudiado en una academia naval, la bibliografía que me cayó a la mano y la guía certera de un genial astrónomo cubano llamado Jorge Pérez Doval, puede ir armando un modelo matemático que, partiendo del dato de una hora y fecha dadas y en unas coordenadas específicas logré hilvanar esas formulaciones matemáticas para que un arquitecto con ganas de lograr un buen resultado en su trabajo de diseño, pudiera obtener los datos necesarios para cumplir ese objetivo.

Lo que se describe en este texto no es más que la forma de procesar los datos y manejar las ecuaciones necesarias para llegar a las llamadas Coordenadas Solares del Sistema Horizontal que son, como ya se ha dicho, el Acimut Solar y la Altura Solar que se definen de forma clara en el libro.

Este método de cálculo o modelo matemático es factible de usar sin mayor agotamiento para un arquitecto cuando se trata de lograr un

¿Sabías que?

En el año 1967 en la decimotercera conferencia general sobre pesas y medidas se definió la duración de un segundo como 9 192 632 770 períodos de radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133 (Wikipedia, 2021).

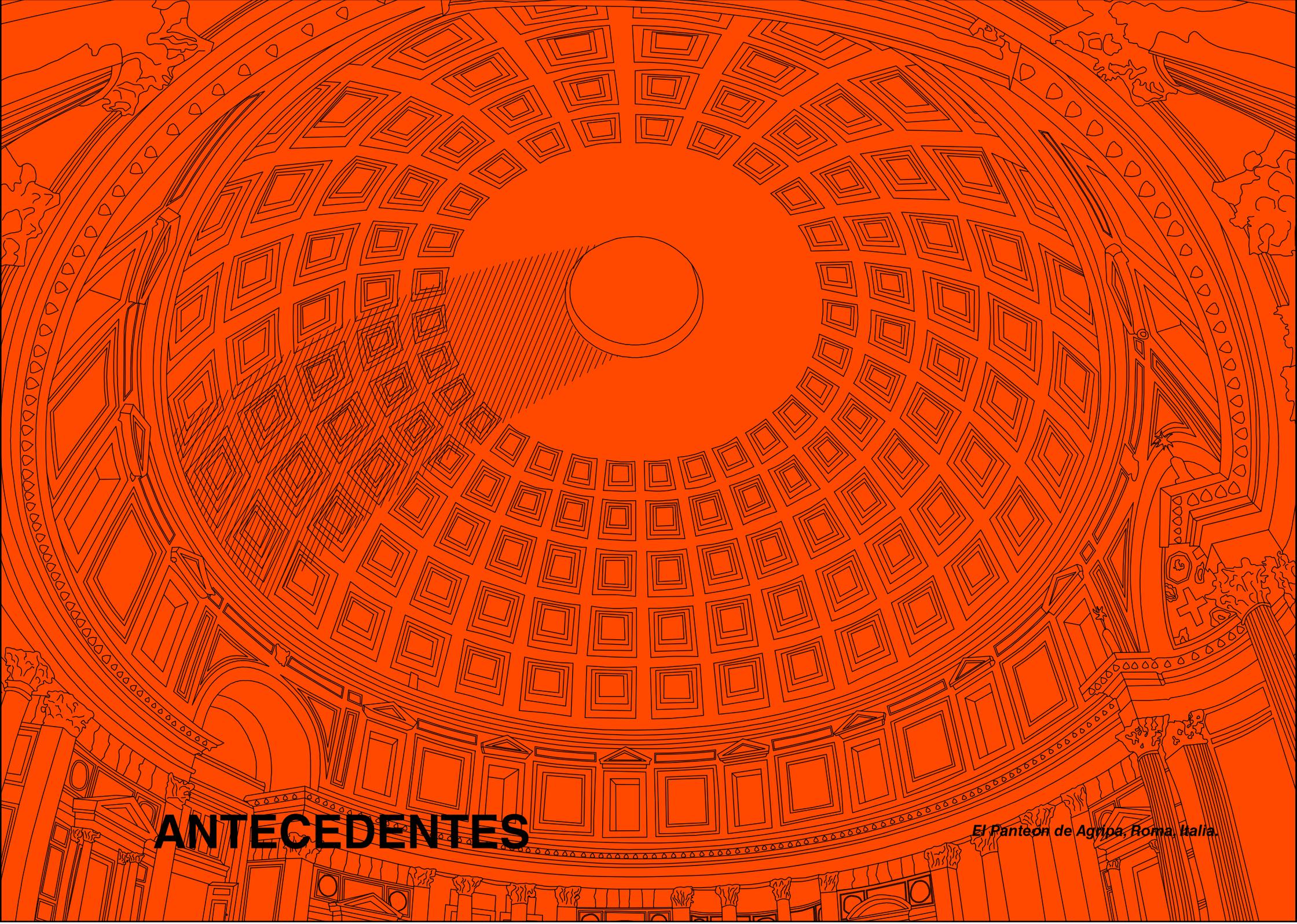
efecto específico en un momento dado; los ejercicios resueltos en este texto son un ejemplo de ello, pero en el caso de diseñar, por ejemplo, un calendario solar como el de La Plaza Martiana de Las Tunas usando el recorrido de la sombra del extremo de un gnomon durante todo un año se recomienda usar el software basado en ese modelo matemático al que denominamos Dig-5 (Bárbaro & Alás, 2005; Perez Orozco & Alás Verdecia, 2015), que permite hacer los cálculos y tabular los datos necesarios con gran rapidez y precisión y cuenta con una “calculadora solar” que puede dar datos específicos para un instante dado en cualquier punto sobre el Globo sin tener siquiera que tabular nada más que lo que se necesita.

Es importante señalar que se ha demostrado experimentalmente en diferentes latitudes de La Tierra, incluyendo el Hemisferio Sur, la efectividad de este método de cálculo así como el software Dig-5 (Bárbaro & Alás, 2005; Perez Orozco & Alás Verdecia, 2015) basado en él; con esto se pone en manos de los arquitectos y demás personas interesadas en el tema solar una herramienta útil y precisa con la cual pueden echar a volar la imaginación y lograr muy buenos resultados en su labor de diseño.



*Figura 6. La Tierra y el Sol.
Fuente: Pixabay.*

ANTECEDENTES



ANTECEDENTES

El Panteón de Agripa, Roma, Italia.

Gran templo Abu Simbel

En Nubia, al sur de Egipto, se encuentra un conjunto de monumentos declarados Patrimonio de la Humanidad (mpembed, 2021; UNESCO, 2021), en él destaca el gran templo Abu Simbel (Figura.8) dedicado al faraón Ramsés II y a su esposa favorita Nefertari, su construcción se logró mediante el tallado directo en la roca de la montaña, logrando una fachada de aproximadamente 33 m de altura y 38 m de ancho.

El templo guarda en el fondo de la sala del santuario cuatro estatuas esculpidas en la roca que son iluminadas por los rayos del Sol naciente (Figura. 9) después de recorrer 60 m desde la entrada principal, esto ocurre en ciertos días del año correspondiendo probablemente a un instante decisivo del culto. El momento más impresionante ocurre en dos ocasiones, en los días 21 de octubre y 21 de febrero, cuando los primeros rayos de Sol atraviesan la oscuridad del templo para acariciar las figuras divinas de los dioses Amón y Ra-Horajti -Dios del Sol-, y el Rey Ramsés en el medio, animándolo completamente por la claridad del Astro; en cuanto a la cuarta estatua Ctóanica Ptah, Dios relacionado con el inframundo, siempre permanece en penumbra (mpembed, 2021).



Figura 8. Gran templo Abu Simbel.
Fuente: Pixabay.

Al igual que los egipcios otras culturas más cercanas en el tiempo han impregnado en sus obras arquitectónicas del misticismo que otorga el uso consiente de la iluminación solar. Los Mayas se destacaron, entre otras cosas, por realizar obras esplendorosas que han perdurado en el tiempo, uno de los ejemplos más relevantes es el Templo El Castillo ubicado en la península de Yucatán en México (Leyva Guzmán & Villacís Ormaza, 2022; Ortiz García, 2012a; Rovira, 2010; Sánchez Nava, 2015).



Figura 9. Gran templo Abu Simbel. Sala del santuario.
Fuente: Flickr.

Templo El Castillo en Chichen Itza

Otro ejemplo en el que la arquitectura se vincula al Sol es El Castillo, en Chichen Itza México, en esta pirámide se logra un interesante efecto de sombra proyectada por el Sol los días de los equinoccios o en fechas cercanas a estos. El efecto consiste en que la sombra del perfil de las escalinatas se mueve dando la impresión de que una Serpiente Emplumada – Kulkán- baja o sube. La cabeza de la serpiente en la base de la pirámide (Figura 10) es una escultura que representa de forma magnífica la testa del reptil (Aveni et al., 2004; Carlson, 1999; Šprajc & Sánchez, 2013). El conocimiento del Sol de los Mayas también se hizo patente en casi la totalidad de las edificaciones realizadas en la península de Yucatán, donde existen estudios, que prueban el uso del Sol para el replanteo y la ubicación de dichas obras (Sánchez Nava, 2015).



Figura 10. Templo El Castillo en Chichen Itza.
Vista frontal.
Fuente: Pixabay.



Figura 11. Templo El Castillo en Chichen Itza.
Detalle de la cabeza de la serpiente.
Fuente: Pixabay.

Capilla Notre Dame du Haut Romchamp

La utilización de la iluminación solar con fines simbólicos no se ha restringido solamente a épocas pasadas, también en la arquitectura del Movimiento Moderno existió la necesidad de incorporar la luz con propósitos espirituales.

Más cercano en el tiempo, se encuentra la Capilla Notre Dame du Haut Romchamp (1950-1954) ubicada en Francia (Figura.11). En esta iglesia del Movimiento Moderno, su autor Le Corbusier (1887 - 1965), le agrega a la bien estudiada expresión formal perforaciones de diferentes dimensiones en los muros, estos orificios ubicados en la fachada sur funcionan como linternas de luz solar (Figura. 12), proyectando un hermoso espectáculo luminoso en la nave principal en diversas épocas del año, que le confieren al interior un ambiente irreal y místico.



Figura 12. Capilla Notre Dame du Haut Romchamp.
Fuente: Pixabay.



Figura 13. Linterna de luz solar. Capilla Notre Dame du Haut Romchamp.
Fuente: Flickr.

Sun Tunnels

Pero en la creación del hombre, el Sol, no solo ha tomado valor preponderante en la arquitectura. A fines de los años sesenta, algunos artistas plásticos comenzaron a abandonar las galerías y museos para interesarse en los sitios naturales u otras zonas, iniciando una nueva tendencia con el nombre de Earth Art o Land Art. En 1967 la artista Nancy Holt (1938 – 2014) crea los Sun Tunnels (Figura. 14) en el desierto en Utah en los Estados Unidos (HOLT SMITHSON FOUNDATION, 2021; UMFA Utah Museum of Fine Arts, 2021), constituido por cuatro túneles solares de 6,00 m de largo y 2,50 m de diámetro cada uno, orientados en función de los solsticios. Estos cilindros tienen en sus superficies agujeros que corresponden a las constelaciones, convirtiéndose a la vez en un observatorio del cielo diurno y nocturno.

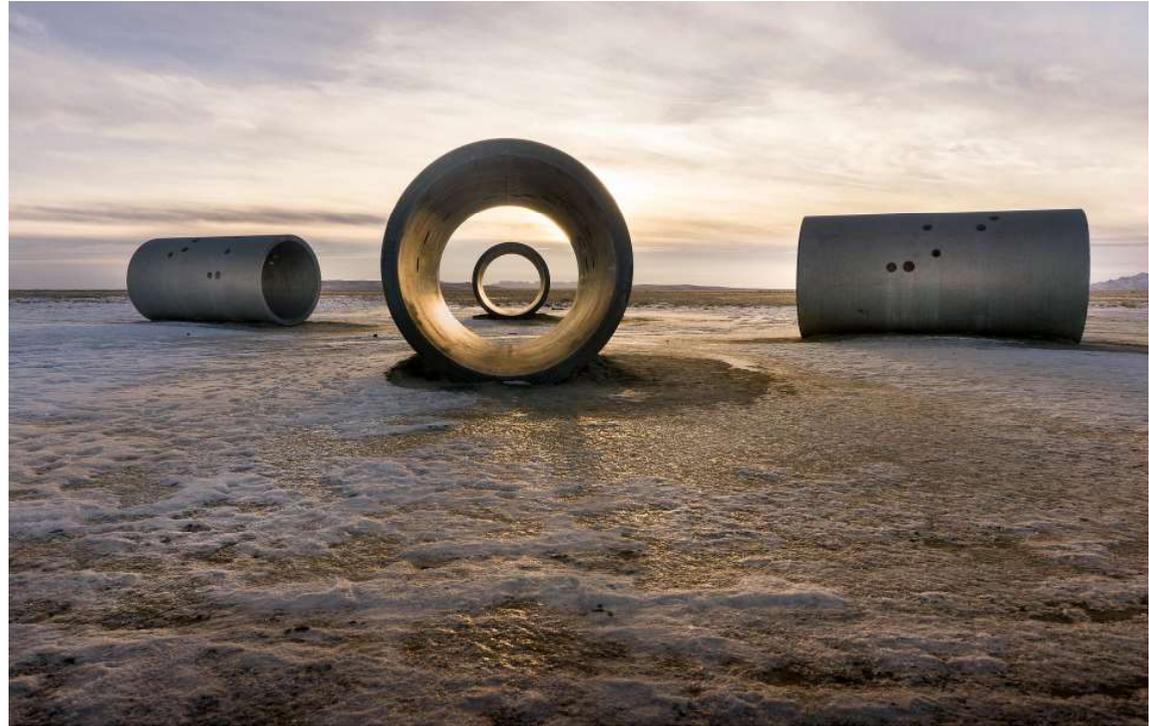


Figura 14. Sun's Tunnels obra de Nancy Holt.
Fuente: Pixabay.

Punto Flotante

En las obras anteriores hemos podido apreciar el uso de la iluminación del Sol en la arquitectura con fines simbólicos, y, en los Sun's Tunnels de Nancy Holt se puede evaluar como el Sol se puede vincular en una instalación del tipo escultórica. Para terminar, se propone el análisis de una instalación a escala urbana, para enfatizar que el uso de Sol puede ser tan variado como sea necesario, pudiéndose integrar al diseño en cualquier escala y contexto.

Punto flotante es una instalación temporal realizada en Santiago de Chile como parte de la 12 Bienal de Artes Mediales en el 2015. Su autor Esteban Serrano se valió de tres espejos ubicados en una azotea y controlados por computador para generar un efecto lumínico en la fachada de la edificación adyacente. Los puntos de luz se mueven coordinadamente dibujando una elipse a cada hora, la misma que pueden percibir desde la distancia. Como elemento significativo se puede señalar el uso de varios softwares para generar tal efecto lumínico, permitiendo poder controlar al mismo tiempo la geometría del sitio, las coordenadas cartesianas del entorno físico y las coordenadas polares del Sol (Uribe, 2016).



Figura 15. Vista de los puntos flotantes desde la distancia.

Fuente: <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/782392/punto-flotante> por Begoña Uribe. Foto: Francisco Jullian.

Las obras antes mencionadas, forman parte de una selección mucho más amplia de edificaciones que, a lo largo de la historia de la humanidad, los arquitectos han realizado con el uso del Sol de forma protagónica. Los efectos solares logrados, tienen como factor común, el conocimiento escaso del posicionamiento solar, todas son producto de metodologías experimentales o métodos gráficos, sobre todo las más recientes. Existen pocos ejemplos que apliquen algún efecto solar que provenga de una metodología de cálculo o analítica, por tal motivo, este texto brinda todos los elementos necesarios para lograr incorporar el Sol con un alcance superior en complejidad y diseño.



Figura 16. Vista de los tres espejos que generan el efecto de iluminación.

Fuente: <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/782392/punto-flotante> por Begoña Uribe. Foto: Francisco Jullian.

**PARTE 1.
APUNTES
SOBRE
CINEMÁTICA
SOLAR**

A line drawing of a Mayan pyramid, specifically the Temple of El Castillo in Chichen Itza, Mexico. The drawing is rendered in white lines on a solid orange background. The pyramid features a wide staircase on the left side and a temple structure at the top with two columns. To the left of the pyramid, there is a large serpent head (Kukulcan) with its mouth open, looking towards the pyramid. The text 'PARTE 1. APUNTES SOBRE CINEMÁTICA SOLAR' is overlaid on the lower left portion of the drawing.

PARTE 1.
APUNTES SOBRE
CINEMÁTICA SOLAR

Templo El Castillo en Chichen Itza, México.

PARTE 1. APUNTES SOBRE CINEMÁTICA SOLAR

Nuestra galaxia se formó hace unos quince mil millones de años a partir de una enorme nube de Hidrógeno y Helio equivalentes a cien mil millones de veces la masa del Sol. Simultáneamente al nacimiento de nuevas estrellas, la gravedad, la rotación y las turbulencias la fueron modelando hasta convertirla en una galaxia del tipo espiral barrada (Enciclopedia Salvat, 1984), alrededor de la cual se extienden cinco ramificaciones denominadas brazos espirales que emergen de lados opuestos del núcleo central, describiendo varias vueltas alrededor del núcleo al mismo tiempo que se alejan del centro (Enciclopedia Salvat, 1984; GeoEnciclopedia, 2020; McFadden et al., 2007).

Las estrellas nacen en las zonas oscuras repletas de gas y polvo. Situada entre los brazos espirales precisamente, en una de estas regiones hace más de 4 600 millones de años nació el Sol, pero en términos estelares apenas ha alcanzado su madurez. Pocas cosas más se conocen con certeza, la polémica sobre el origen del sistema solar empezó hace doscientos cincuenta años y es posible que continúe doscientos cincuenta años más (Enciclopedia Salvat, 1984; GeoEnciclopedia, 2020; McFadden et al., 2007; Rovira, 2010).



Figura 17. La Vía Láctea.

Fuente: <https://apod.nasa.gov/apod/ap051004.html> por Serge Brunier.

El Sol

El Sol, estrella alrededor de la cual gravita la Tierra y los demás astros del sistema solar, es el centro de nuestro sistema planetario, está compuesto por hidrógeno en elevadas cantidades; a gran profundidad del Globo Solar, donde la temperatura es de unos 14 000 000,0 °C y la presión muy elevada, los núcleos de los átomos de Hidrógeno se unen para formar átomos de helio, este proceso de fusión nuclear va acompañado de la liberación de energía siendo la responsable de la actividad solar y de la vida en la tierra (Enciclopedia Salvat, 1984; McFadden et al., 2007; Rovira, 2010).

El radio del Sol mide 695 500 Km, o sea 109 veces más que el radio terrestre y alrededor de 1,8 veces la distancia de la Tierra a la Luna; determina un volumen 1 300 000,00 mayor que el de nuestro globo; su masa relativamente pequeña equivale a 333 432,00 veces la de la Tierra. En cuanto a su movimiento de rotación; el Sol da una vuelta alrededor de su eje en unos 26,8 días terrestres en el Ecuador y 28,2 días a 30° de latitud, 31,8 días a 75° de latitud y 34 días los polos. Esto se debe a que el Sol no es un cuerpo rígido, debido a las altas temperaturas que impiden que sea totalmente sólido y sus diferentes regiones se mueven constantemente unas respecto a otras (Figura. 16) (Enciclopedia Salvat, 1984; McFadden et al., 2007; Rovira, 2010).



Figura 18. Foto del Sol tomada por la NASA.
Fuente: Foto de Joel Kowsky origen Flickr.

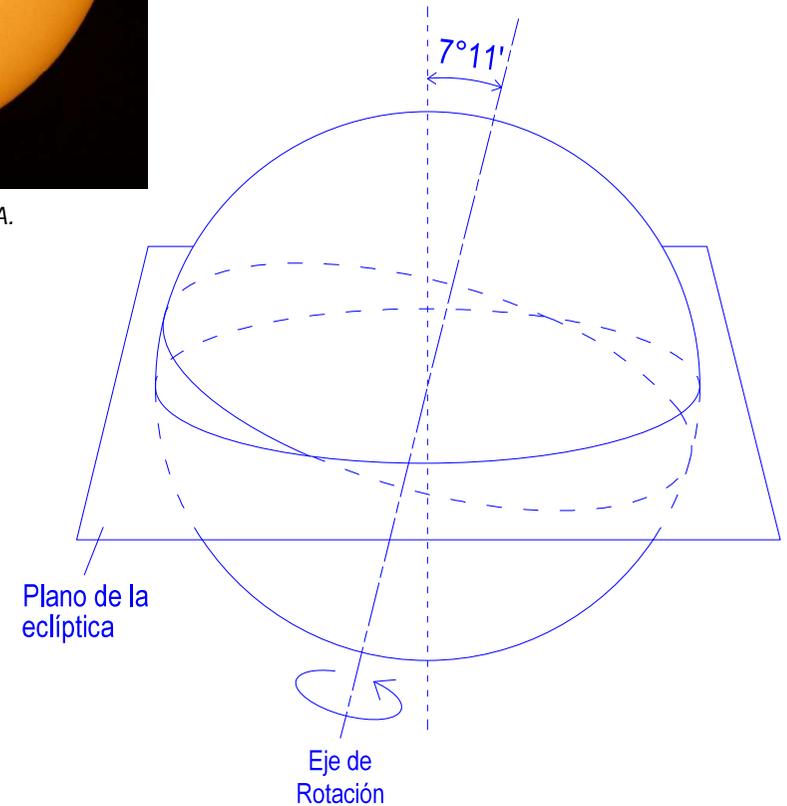


Figura 19. Rotación del Sol.

La Tierra

La Tierra es el tercer planeta a partir del Sol, situándose en el grupo de los planetas menores y más próximo a él. Posee forma esférica, pero como no es una esfera perfecta puede decirse que es un elipsoide o geoide (Bakulin et al., 1986), aunque la figura real de ésta se diferencia tanto del esferoide como del elipsoide triaxial, y no puede ser representada por ninguna de las figuras matemáticas conocidas. Al hablar de la figura Tierra, no se tiene en cuenta la forma física de la superficie terrestre, con sus océanos y continentes, con sus elevaciones y depresiones, sino que se trata de la denominada superficie del geoide, dicha configuración se debe a que como se conoce su movimiento de rotación sobre su eje desarrolla una fuerza centrífuga que provoca el abultamiento en el Ecuador y su achatamiento en los polos (Enciclopedia Salvat, 1985; McFadden et al., 2007).

A continuación, ofrecemos algunos datos numéricos de la Tierra (McFadden et al., 2007):

- Distancia al Sol (máximo): 152 000 000 km.
- Distancia al Sol (media): 149 597 870 km.
- Distancia al Sol (mínima): 147 000 000 km.
- Excentricidad de la órbita: 0,0167
- Diámetro ecuatorial del Globo 12 756, 78 km.
- Velocidad circular a nivel del mar: 7,9 km/s.
- Oblicuidad de la eclíptica (inclinación de la Tierra respecto a la perpendicular de la órbita): 23°26'29,70"

Así mismo nuestro planeta se encuentra sometido a una serie de complejos movimientos, aunque para nuestro estudio nos interesan solo tres:

- 1.- El movimiento de rotación sobre su eje.
- 2.- El movimiento de traslación alrededor del Sol.
- 3.- El movimiento de precesión del eje de rotación de la Tierra.



Figura 20. Foto de la Tierra tomada por la NASA.
Fuente: <https://apod.nasa.gov/>

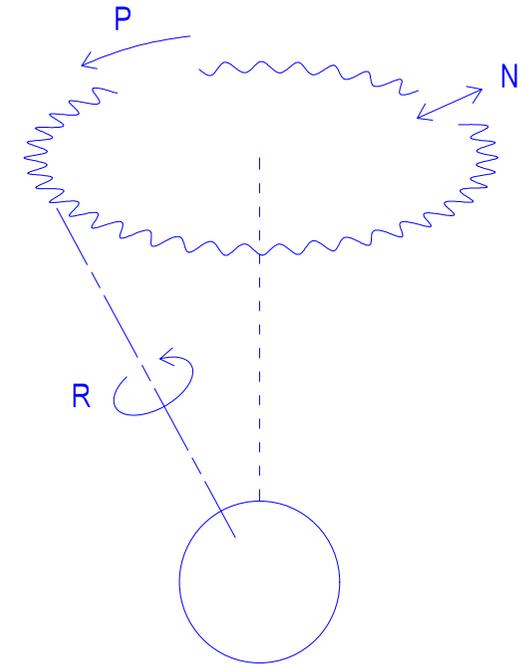
Movimiento de rotación sobre su eje

La Tierra gira sobre sí misma entorno a una línea imaginaria que pasa a través del centro de masa de ésta y se llama eje de rotación (Figura. 19). Este eje corta la Tierra en dos puntos: en el polo geográfico Norte y en el polo geográfico Sur. Perpendicular a él se encuentra el círculo máximo de la superficie de la Tierra, denominado Ecuador Terrestre dividiendo la Tierra en dos hemisferios, el boreal (Norte) y el austral (Sur) (Enciclopedia Salvat, 1985; Lacomba et al., 1991; McFadden et al., 2007).

A diferentes latitudes la velocidad instantánea varía desde un máximo de 465 m/s aproximadamente en el Ecuador disminuyendo prácticamente a cero en los polos (Figura. 20) (Enciclopedia Salvat, 1985; McFadden et al., 2007).

La rotación de la Tierra sobre su eje transcurre casi uniformemente y al complementar una vuelta da lugar a la unidad de tiempo denominada día; cuya duración difiere ligeramente según la referencia adoptada para medir dicha revolución. El día astronómico dura 24 horas contadas a partir del paso superior por el meridiano del astro que sirve de referencia; el día astronómico puede ser verdadero, sidéreo o medio. El día civil es aquel de 0 h a 24 h contadas a partir del paso inferior del astro de referencia por el meridiano, o sea contada entre dos medias noches sucesivas. El día sidéreo es el intervalo entre el paso dos veces consecutivas

de una misma estrella por el meridiano del lugar, y dura por término medio 23 h, 56 min, 4,09 s. y experimenta variaciones de hasta 0,01 s en más o en menos. El día solar verdadero responde al intervalo entre dos pasos consecutivos del Sol por un meridiano, su duración varía según la posición de la Tierra en su órbita; de ahí la necesidad de adoptar el día solar medio, que es el promedio de la duración del día solar en el curso de un año completo (AstroMía, 2022; Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985).



R - Rotación, P - Precesión y N - Nutación

Figura 21. Ejemplos de movimientos de la Tierra.

¿Sabías que?

En el movimiento de precesión el eje de rotación de la tierra describe lentamente alrededor del eje perpendicular de la eclíptica un cono, permaneciendo siempre inclinado respecto al plano del movimiento de la Tierra en un ángulo de 66,34°. El período de este movimiento es de unos 26 mil años (AstroMía, 2022).

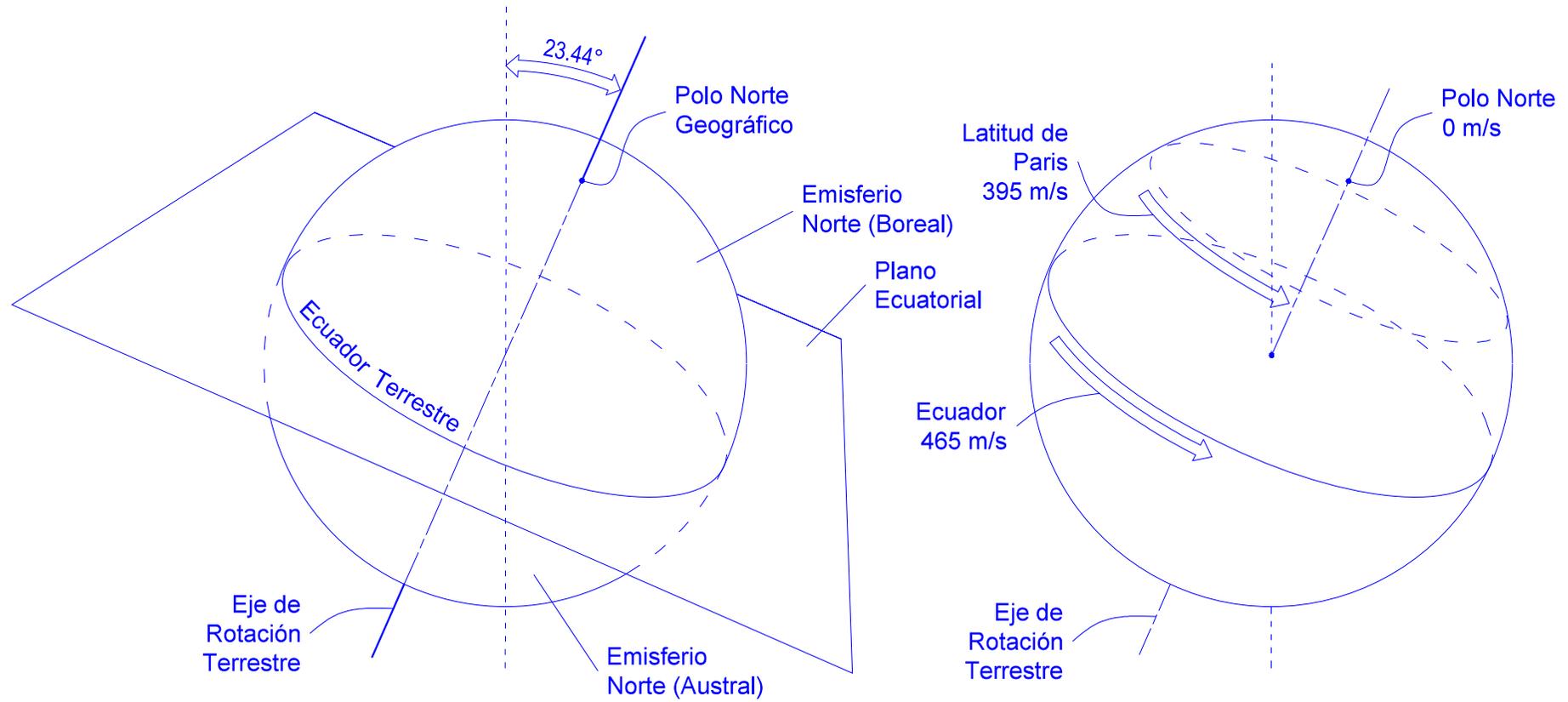


Figura 22. La Tierra y su movimiento de rotación.

Movimiento de traslación alrededor del Sol

Al mismo tiempo que gira sobre sí misma, la Tierra se mueve alrededor del Sol en igual dirección de la rotación sobre su eje.

Este movimiento de traslación lo completa nuestro planeta cada 365 días, 5 h, 48 m, 45,9999936 s. (365,242199074), lo que constituye el año trópico (Figura. 21). Pero dicho año no comprende un número entero de días lo cual es incompatible con las exigencias de las actividades humanas. De ahí la institución de un año civil o año gregoriano cuya duración media es de 365 días, 5 h, 49 min, 12 s y que resulta de la existencia de 3 años comunes y sucesivos de 365 días y seguido de un año bisiesto de 366 días (cuyo día complementario es el 29 de febrero). Con este sistema han de pasar 4 000 años antes de que el año civil y el año trópico difieran en un día entero (Bakulin et al., 1986; Beckers et al., 2007; Enciclopedia Salvat, 1985; Lacomba et al., 1991; PerformativeDesign, 2019a).

La trayectoria que describe la Tierra en su movimiento de traslación es llamada órbita terrestre, la cual mide aproximadamente 930 millones de kilómetros y es recorrida por nuestro planeta a una velocidad promedio de 29,78 km/s. Este recorrido orbital no es una circunferencia perfecta, sino ligeramente elíptica, formando a su vez el plano de la eclíptica. El eje mayor de la elipse que describe dicha trayectoria se llama línea de los ápsides y sus extremos coinciden con dos puntos, el más cercano al Sol al que se le denomina perihelio y el más lejano del Sol llamado afelio (Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985).

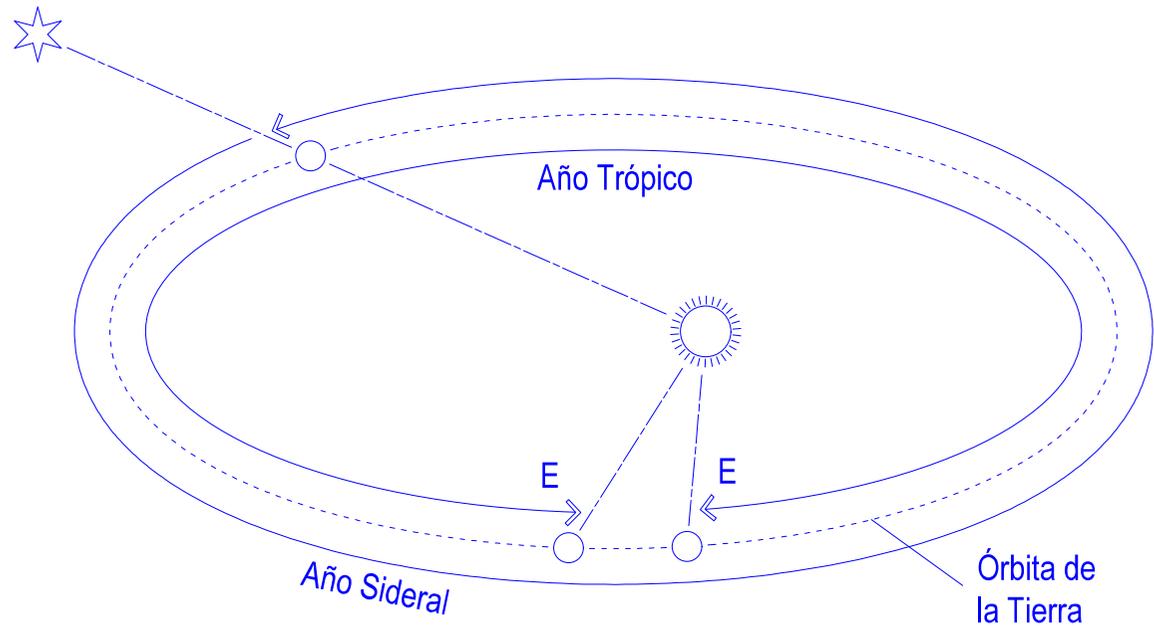


Figura 23. Año Trópico y Año Sideral.

De esta manera el eje de rotación de la Tierra siempre está inclinado respecto al plano de la órbita de la Tierra en un ángulo de $66^{\circ}33'31''$; al mismo tiempo el plano de la órbita terrestre que contiene el plano de la eclíptica está inclinado respecto al plano del Ecuador de la Tierra o Ecuador Celeste en un ángulo de $23^{\circ}26'29,70''$; cortándose en su intersección en dos puntos: el Equinoccio de Primavera y el Equinoccio de Otoño (Figura 22) (PerformativeDesign, 2019b).

El propio movimiento de traslación de la Tierra combinado con la inclinación de su eje trae como consecuencia la distribución desigual de la luz y el calor solar recibido por cada región de la Tierra en el transcurso de una revolución, lo que da lugar a la distinta duración del día y de la noche en diferentes épocas del año y a la latitud así como las estaciones, separándolas entre sí por los dos equinoccios y los dos solsticios (Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985; Lacomba et al., 1991; McFadden et al., 2007).

La descripción de las estaciones que ofrecemos a continuación son para el hemisferio Norte (Boreal) (Figura. 22 y 23) (Castaldi, 2014; Enciclopedia Salvat, 1985).

Primavera: comienza inmediatamente después del invierno, en el equinoccio, y concluye cuando se produce el Solsticio de Verano. La Primavera Boreal empieza en fechas cercanas al 21 de marzo, al llegar la Tierra a la intersección del plano ecuatorial y la eclíptica –declinación solar cero-, hallándose en la Constelación de los Peces y termina alrededor del día 21 de junio cuando el Sol está en la Constelación de Gemelos (AstroPixels.com, 2018; Bakulin et al., 1986; Castaldi, 2014; Enciclopedia Salvat, 1985; Lacomba et al., 1991; NASA en Español, 2021).

Verano: comienza inmediatamente después de la primavera el día del Solsticio de Verano con declinación solar $23^{\circ}26'29,70''$, y acaba cuando se produce el equinoccio de septiembre. El Verano Boreal empieza cercano a los días 21 o 22 de junio y se termina cerca del 22 o 23 de septiembre. El arco recorrido aparentemente en este período por la Tierra es más largo que las demás estaciones. En verano -para el hemisferio norte- la Tierra se halla más lejos del Sol que en invierno, aunque la inclinación -incidencia- de los rayos es mayor (AstroPixels.com, 2018; Castaldi, 2014; Enciclopedia Salvat, 1985; Lacomba et al., 1991; NASA en Español, 2021).

¿Sabías que?

El origen de nuestro calendario se remonta a la Antigua Roma en los tiempos del rey Rómulo. Este calendario comenzaba con el mes Martius –actual marzo- en honor a Martes padre de los fundadores de Roma, que, aunque existía un desfase con respecto a las estaciones, corresponde con el mes del Equinoccio de Primavera. También resulta curioso que el mes de diciembre su nombre significa décimo mes -Decembris- que era la cantidad de meses que tenía el calendario para ese entonces (Wikipedia, 2022a).

Otoño: Esta estación está comprendida entre el Equinoccio de Otoño y el Solsticio de Invierno, o sea del 23 de septiembre aproximadamente al 22 de diciembre, fechas en la que la declinación solar vuelve a ser cero (AstroPixels.com, 2018; Castaldi, 2014; Enciclopedia Salvat, 1985; Lacomba et al., 1991; NASA en Español, 2021).

Invierno: La estación invernal comienza inmediatamente después del otoño y precede a la primavera. Es la estación más corta y dura del 22 de diciembre al 21 de marzo - declinación solar $23^{\circ}26'29,70''$ - en el hemisferio boreal cuando la Tierra se encuentra más cerca del Sol (AstroPixels.com, 2018; Castaldi, 2014; Enciclopedia Salvat, 1985; Lacomba et al., 1991; NASA en Español, 2021).

Es importante aclarar que todo lo antes expuesto está referido al Hemisferio Norte. Para el Hemisferio Sur las estaciones ocurren de forma inversa. La primavera transcurre, al igual que en el hemisferio boreal, entre las estaciones de invierno y verano, pero comenzando en fechas cercanas al 23 de septiembre. El verano o verano austral empieza con el solsticio cercano a los días 21 o 22 de diciembre y se termina cerca del 22 o 23 de marzo, fecha en la que ocurre el equinoccio. El otoño es la transición del verano al invierno, con inicio entre el 22 o 23 de marzo aproximadamente y termina en la fecha comprendida entre el 21 al 22 de junio. El invierno comienza aproximadamente el 21 o 22 de junio y perdura hasta el 22 o 23 de septiembre (AstroPixels.com, 2018; Castaldi, 2014; Enciclopedia Salvat, 1985; Lacomba et al., 1991; NASA en Español, 2021).

Es muy importante tener en cuenta que las fechas del comienzo y fin de cada estación no son exactas, está sujeta a los cambios producto de los movimientos de la Tierra como precesión y nutación (AstroPixels.com, 2018).

Vale señalar que, en los solsticios, tanto en el de verano como en el de invierno, los trópicos de Cáncer y de Capricornio señalan los límites máximos que alcanzan los rayos perpendiculares al Norte y al Sur del Ecuador. De la misma manera los círculos Antártico y Ártico señalan los límites que alcanzan los rayos oblicuos y tangentes del Sol más allá de los polos (Enciclopedia Salvat, 1985).

De esta forma los trópicos y los círculos polares dividen a la Tierra en cinco zonas de iluminación: tropical, templada del Norte, templada del Sur, glacial Ártica y glacial Antártica. Con ello también se moldean, junto con la altura sobre el nivel de mar, el clima o las condiciones climáticas de las regiones que contienen cada zona antes descrita (Figura 24, 25 y 26) (Enciclopedia Salvat, 1985).

Los conocimientos expuestos en esta parte, en el que se analizaron los movimientos de la Tierra alrededor del Sol y sus posibles consecuencias positivas o negativas con relación a la arquitectura, ayudarán a comprender mejor este texto, así como a darle efectivo uso y aplicación práctica.

¿Sabías que?

La Tierra además de la rotación y la traslación posee otros movimientos con referencia al Sol, estos son: precesión, nutación, bamboleo de Chandler y la precesión del perihelio (Bakulin et al., 1986; Meeus, 1998).

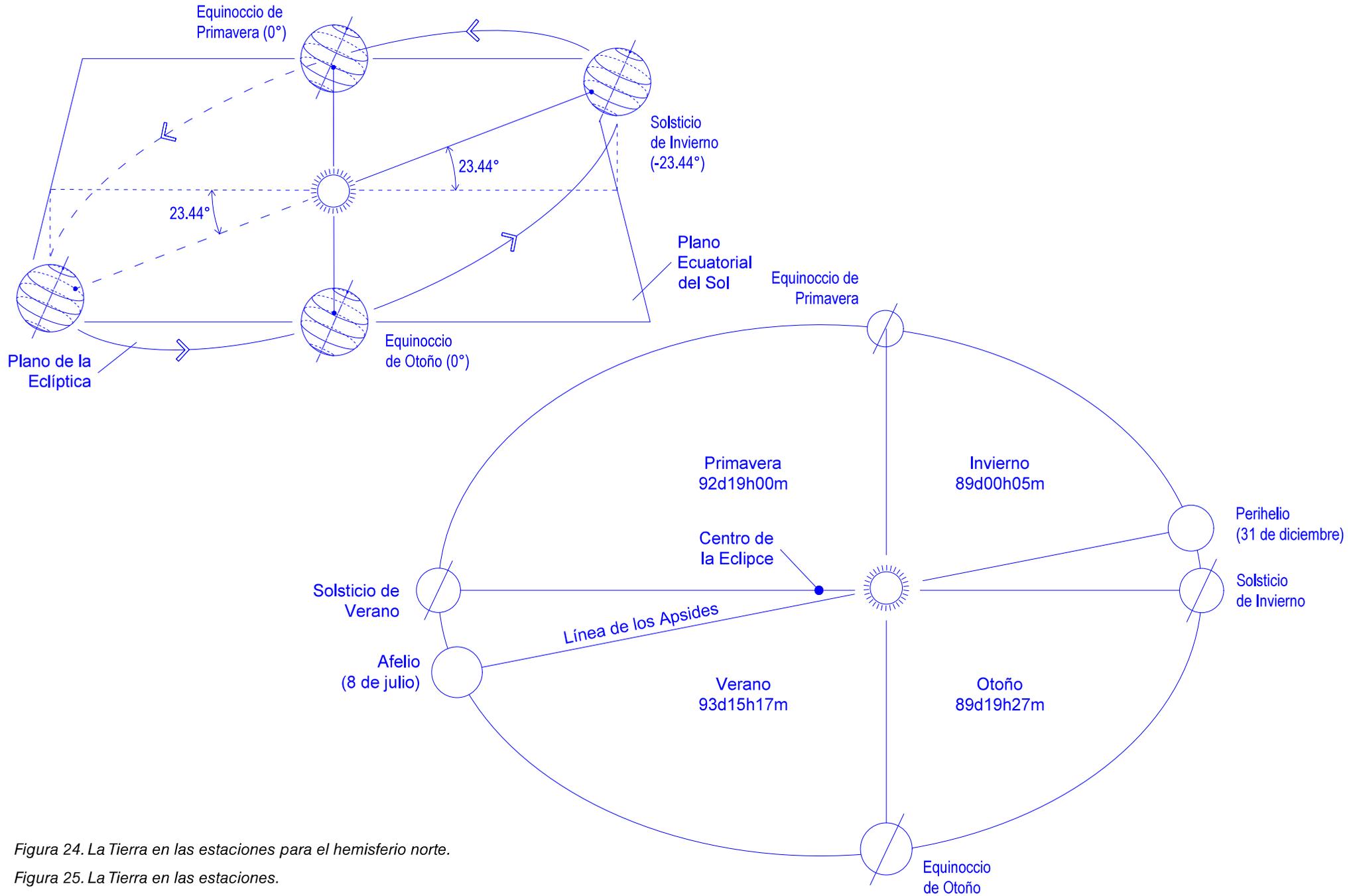


Figura 24. La Tierra en las estaciones para el hemisferio norte.

Figura 25. La Tierra en las estaciones.



Figura 26. Playas tropicales. Entre los trópicos.
Fuente: Pixabay.



Figura 27. Bosques templados. Entre los trópicos y los círculos polares.
Fuente: Pixabay.



Figura 28. Glaciar. Círculo Polar.
Fuente: Pixabay.

PARTE 2.
MOVIMIENTOS
APARENTES
DEL
SOL

A line drawing of the Machu Picchu ruins, showing various structures, terraces, and a central courtyard, set against a background of jagged mountain peaks. The drawing is rendered in a simple, clean style with black outlines on a white background.

PARTE 2.
MOVIMIENTOS APARENTES
DEL SOL

Machu Picchu, Perú.

PARTE 2. MOVIMIENTOS APARENTES DEL SOL

Luego de conocer los aspectos teóricos del movimiento real de la tierra y su consecuencia sobre las estaciones, es pertinente adentrarnos en los aspectos derivados del movimiento aparente del Sol, debido a que, solo mediante este análisis, es que se puede estudiar el posicionamiento del Sol para el estudio en la arquitectura.

Conocemos que el Sol es nuestra estrella y centro del Sistema Solar, en el que rotan todos los planetas en torno a él, partiendo de aquí se expondrán una serie de consideraciones y términos indispensables para poder aplicar en los diferentes métodos de determinación de la posición solar a los efectos de facilitar su estudio.

Consideraciones y términos

Se considera el movimiento del Sol sobre una esfera celeste o bóveda celeste local (BCL), cuyo centro es la Tierra, describiendo trayectorias paralelas cada veinticuatro horas; o como Bakulin denomina a la esfera celeste:

“a la esfera imaginaria de radio arbitrario, con centro en un punto cualquiera del espacio, en cuya superficie los astros se disponen tal como se ven en el cielo en cierto momento desde este punto dado del espacio” (Bakulin et al., 1986).

Dado el pequeño tamaño de la Tierra en comparación con el eje de la esfera celeste, se sustituye el plano del horizonte de un lugar por uno paralelo que pasa por el centro de la Tierra (Bakulin et al., 1986).

Las trayectorias solares vistas desde la Tierra se observan como arcos de circunferencias por encima del horizonte (Bakulin et al., 1986).

Como se describe en la introducción de este libro, existen tres métodos fundamentales para determinar la posición del Sol, y por tanto del asoleamiento para un instante: métodos analíticos, métodos gráficos y métodos experimentales; a continuación, se hace una breve definición de dichos métodos:

Métodos analíticos: Los métodos están basados en la solución de una serie de ecuaciones que responden a la Astronomía, la física y la trigonometría esférica que aportan las coordenadas solares para posibilitar la ubicación del Sol (Global Monitoring Laboratory, 2021).

Métodos gráficos: estos representan la trayectoria del Sol en diagramas o cartas solares y sombrigramas, basados en procedimientos geométricos haciendo uso de distintos sistemas de representación. Estos gráficos son el producto o consecuencia de la aplicación de los métodos analíticos, es decir, que complementan los resultados de los métodos analíticos y los hacen más asequibles e interpretables (Alemany, 1986; Olgyay, 2008).

¿Sabías que?

El gran terremoto de magnitud 9.1, que sacudió la costa del Pacífico en la región de Tohoku en Japón en el 2011, tuvo tanta violencia que alteró el eje terrestre en aproximadamente 10 centímetros y acortó la duración de los días en 1.8 milisegundo según los estudios realizados por los JPL de la NASA (Buis, 2011).

Recorrido del Sol durante el paso por el meridiano

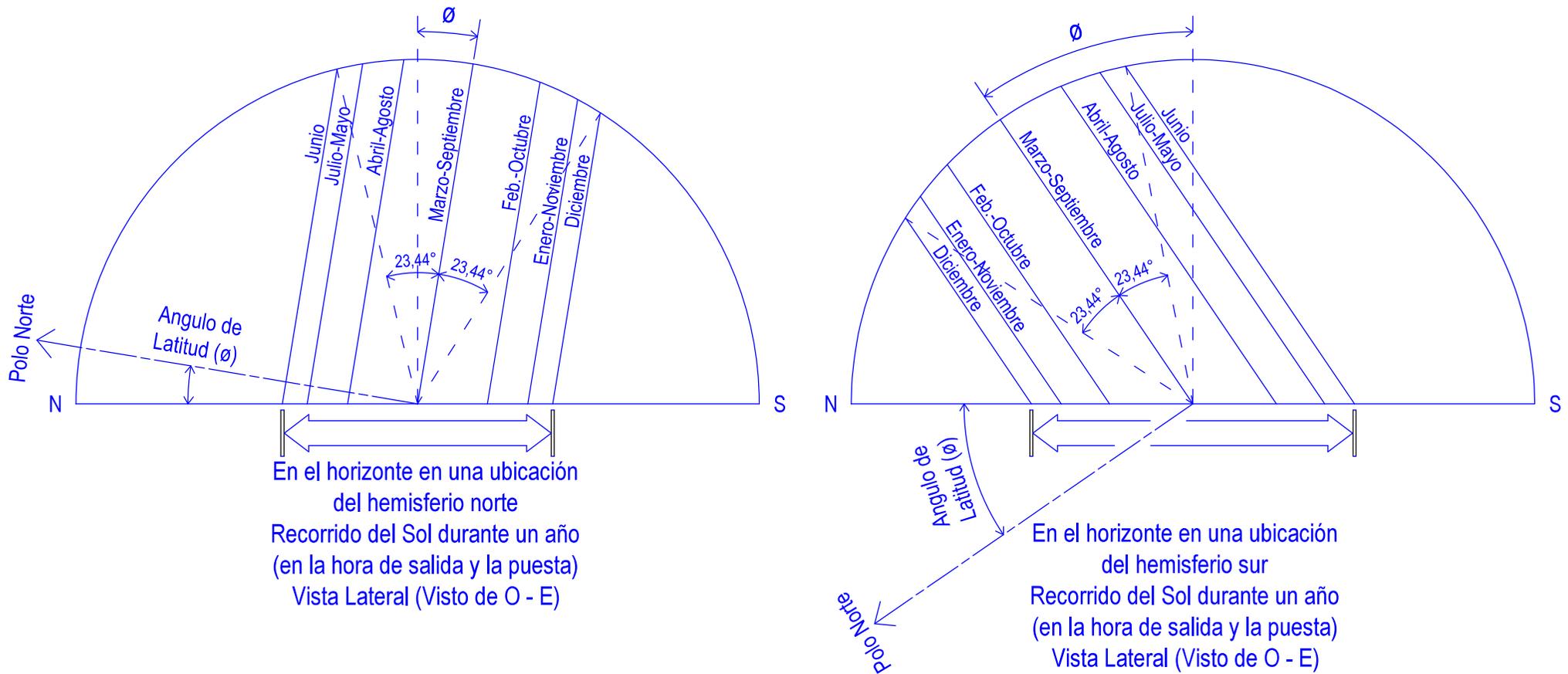


Figura 30. Recorrido del Sol durante el paso por el Meridiano para dos latitudes diferentes.

Métodos experimentales: estos se estudian en maquetas, modelos a escala reducidas o basándose en fotografías; se utiliza principalmente en comparaciones o en desarrollos complejos. Por las dificultades de la determinación de la posición del Sol a partir de métodos gráficos o por el tiempo que exigirían dichos estudios, este método exige de un tiempo prolongado para su empleo (Alemany, 1986; Olgay, 2008). También se han utilizado métodos empíricos experimentales para el estudio del posicionamiento del Sol, este método consiste en el estudio del movimiento del Sol a lo largo de un año para una misma posición (Herrmann, 2020; Leyva Guzmán & Villacís Ormazá, 2022; Ortiz García, 2012a; Sánchez Nava, 2015).

Por tanto, el Sol aparentemente posee dos tipos de movimientos:

El primero y más fácil de observar es el que está dado en el transcurso del día, desde su salida hasta su puesta, provocado por la rotación diaria, por el que se producen las noches y los días (Bakulin et al., 1986).

El segundo, que pasa inadvertido para la generalidad de las personas es el que se observa a lo largo de un año desde el Solsticio de Verano, en el que el Sol sale cercano por el estenordeste (ENE) y se esconde aproximadamente por el oeste noroeste (ONO) hasta el Solsticio de Invierno en el que el Sol aparece por el este-sudeste (ESE) y se oculta por el oeste suroeste (OSO); mientras que

en los equinoccios el Sol se alza por el este franco (E) y se pone por el oeste (O). Este movimiento de norte a sur es consecuencia de la traslación terrestre alrededor del Sol y a la inclinación del plano de la Eclíptica en combinación con la inclinación de los rayos solares a consecuencia de la curvatura del globo terráqueo. Como se ha mencionado este movimiento de traslación de la Tierra es la causa de que se produzcan las estaciones (Bakulin et al., 1986).

Aunque es oportuno aclarar que, para ubicaciones cercanas a los polos terrestres, este movimiento se aprecia de manera considerablemente diferente, pues el mismo solo se ve por temporadas y viceversa (Bakulin et al., 1986).

La traslación aparente de los recorridos del Sol en la bóveda celeste local (BCL) responde a los movimientos de revolución y traslación anual de la Tierra. A estos movimientos aparentes de los recorridos del Sol en la bóveda celeste local o esfera celeste, le llamaremos trayectoria solar diaria y anual (Bakulin et al., 1986).

Los movimientos antes descritos tienen que ver directamente con el diseño arquitectónico, ya que la acción solar sobre los edificios varía constantemente tanto en el día como en el año. Pero en su recorrido de regreso el Sol va tomando posiciones sucesivas a la inversa repitiendo similares trayectorias para cada día de manera que, en el año, a cada día le corresponde otro homólogo, exceptuando los Solsticios que no lo tienen (Bakulin et al., 1986).

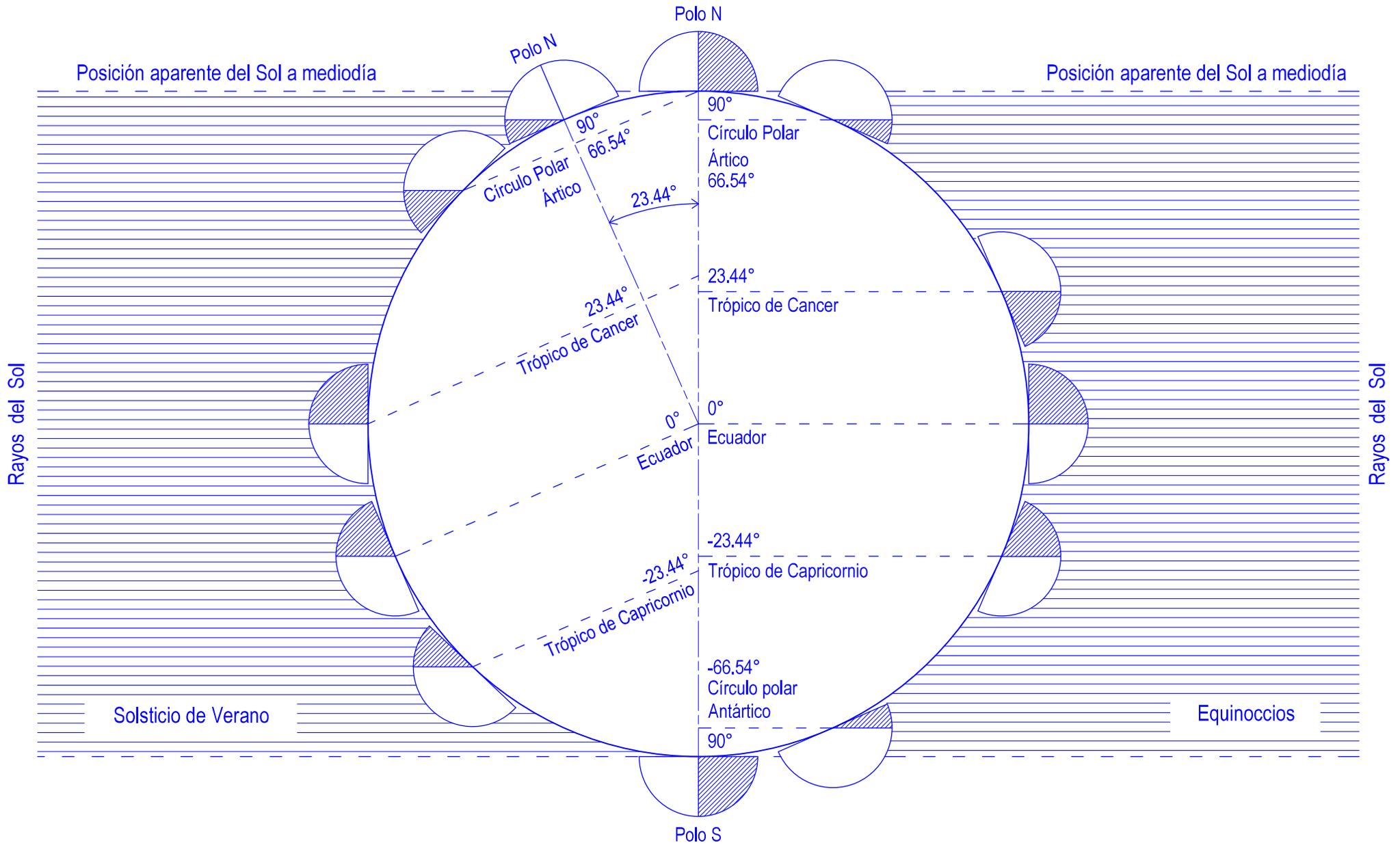


Figura 31. Incidencia de rayos del Sol para diferentes regiones o latitudes.

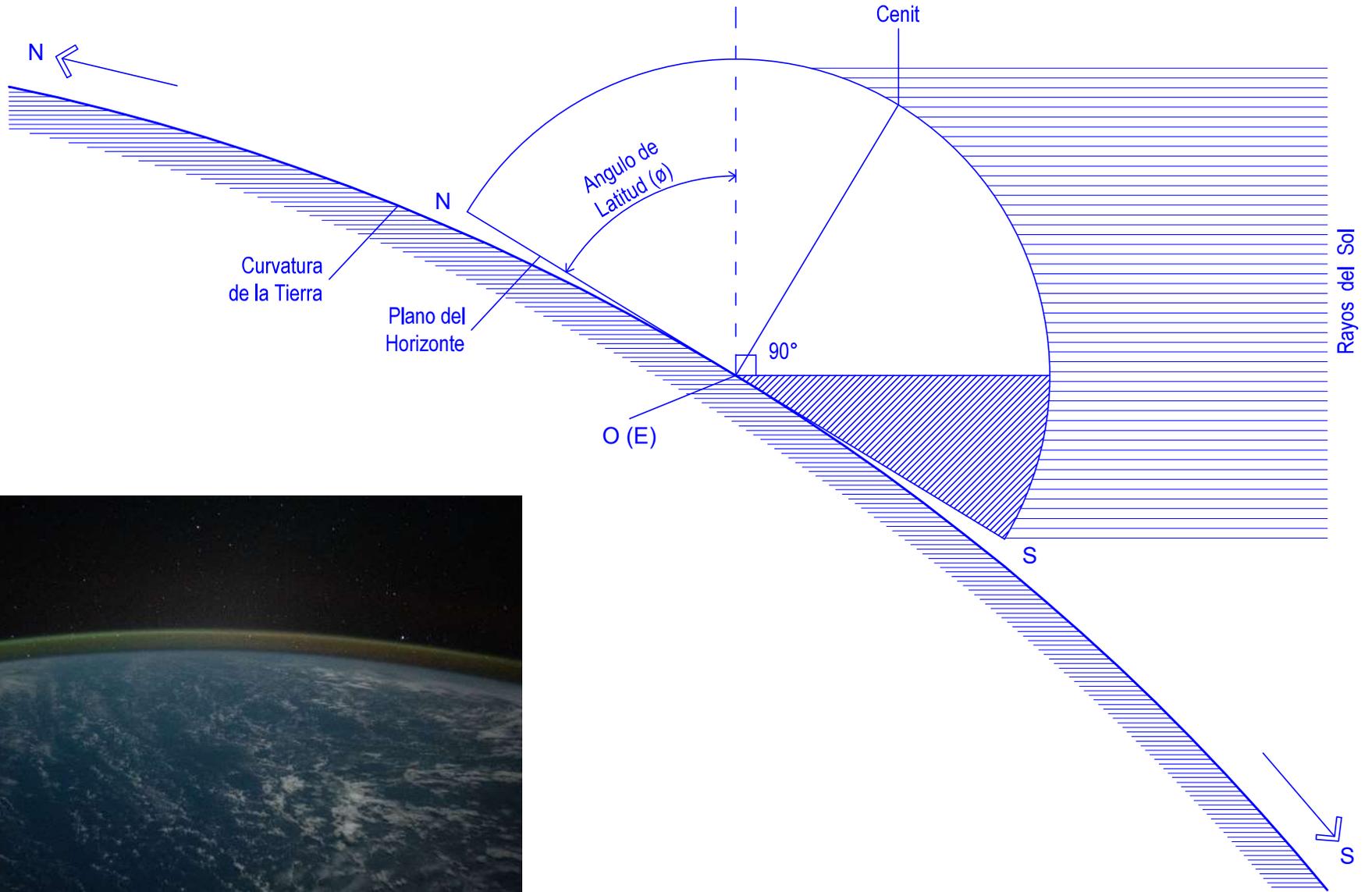


Figura 32. Incidencia de los rayos del Sol para una latitud específica.



Figura 33. La tierra y su curvatura, vista desde la Estación Espacial Internacional a 261 millas sobre el Océano Pacífico al sureste de Japón.
Fuente: <https://apod.nasa.gov/>

Sistemas ecuatorial y horizontal de coordenadas celestes

Para conocer las diferentes posiciones del Sol con fines de diseño es necesario determinar de alguna forma su situación, ya hemos dicho que para ello existen métodos gráficos, analíticos y experimentales. Es sabido que los métodos analíticos nos permiten determinar las coordenadas solares para cualquier instante del año, referido a un punto determinado del globo terrestre. Describamos entonces los tipos de coordenadas celestes y su forma de cálculo (Bakulin et al., 1986).

La posición del Sol en el firmamento se determina unívocamente respecto a los planetas de referencia, líneas y puntos, de la esfera celeste ligados a estos y se expresa cuantitativamente con dos magnitudes, que son arcos inscriptos en la Bóveda Celeste Local (BCL) o ángulos centrales (Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985; Meeus, 1998).

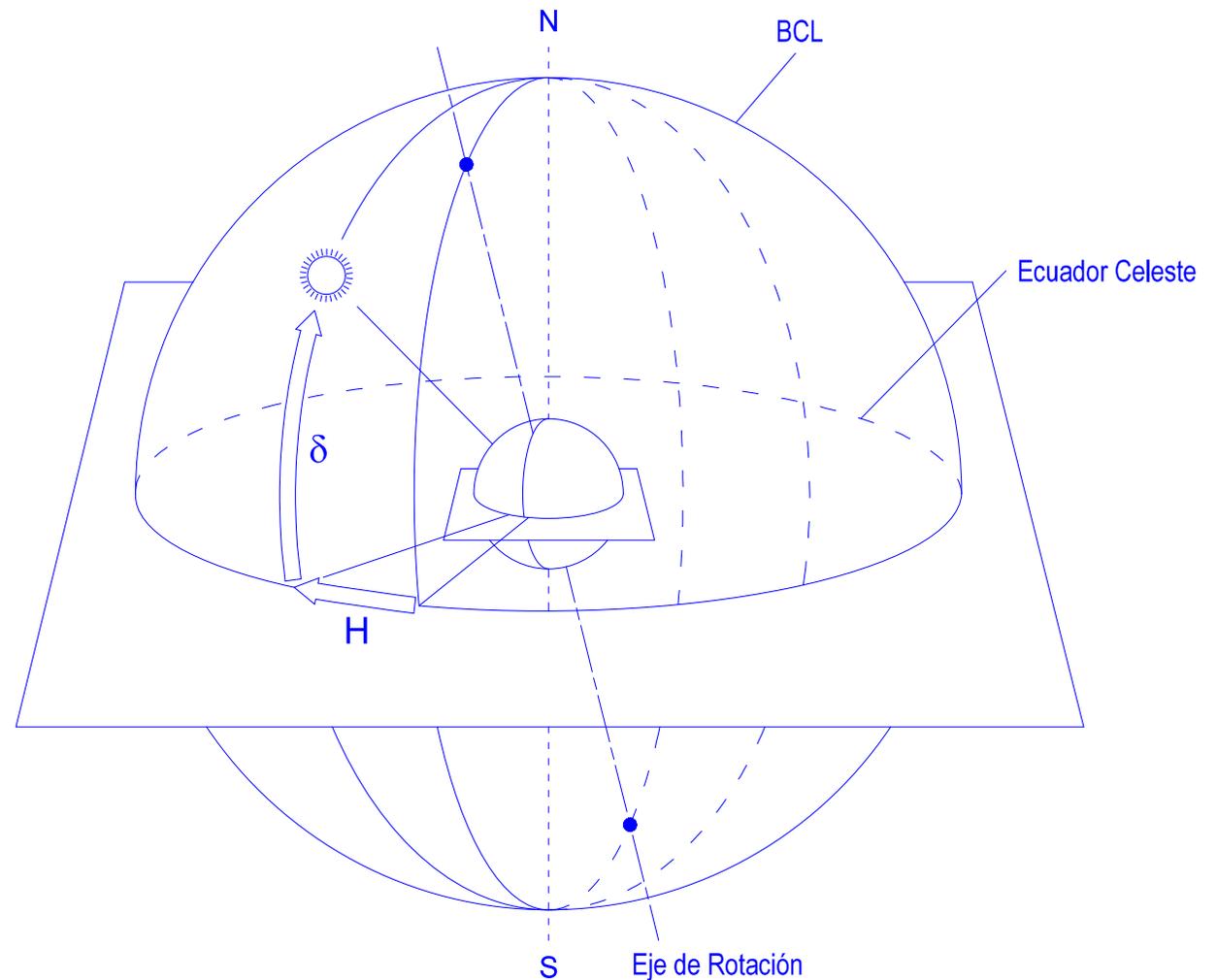


Figura 34. Sistema ecuatorial u horario de coordenadas.

Coordenadas del sistema ecuatorial u horario

El sistema ecuatorial u horario está ligado al Ecuador Celeste y sus coordenadas son la declinación solar (δ) y el ángulo horario (H) (Figura. 32) (Bakulin et al., 1986; Beckers et al., 2007; Enciclopedia Salvat, 1985; Franco García, 2016).

El ángulo horario (H): está dado por el desplazamiento angular del Sol tomado desde su posición al mediodía, o lo que es lo mismo el ángulo que comprende entre el meridiano del Sol y el meridiano del observador o del lugar. Por tanto, cada revolución diaria está dado por el paso del Sol dos veces consecutivas por el mismo lugar barriendo 360° o 24 horas (Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985; Meeus, 1998).

Este ángulo se mide a partir del meridiano en estudio en sentido retrógrado hacia el Oeste mirando del Sur al Norte de (0° a 360° o 0 a 24 horas) y va aumentando progresivamente correspondiéndole a cada hora 15° y a cada grado 4 minutos (Figura. 35) (Meeus, 1998).

Las expresiones analíticas para el cálculo del ángulo horario H. Son:

[1]

$$H = 15^\circ(td - 12); \text{ de 12 meridiano a la medianoche}$$

[2]

$$H = 15^\circ(12 + td); \text{ de medianoche hasta las 12 meridiano}$$

Donde:

td: es el tiempo en horas desde las 00:00 horas hasta las 24:00 horas.

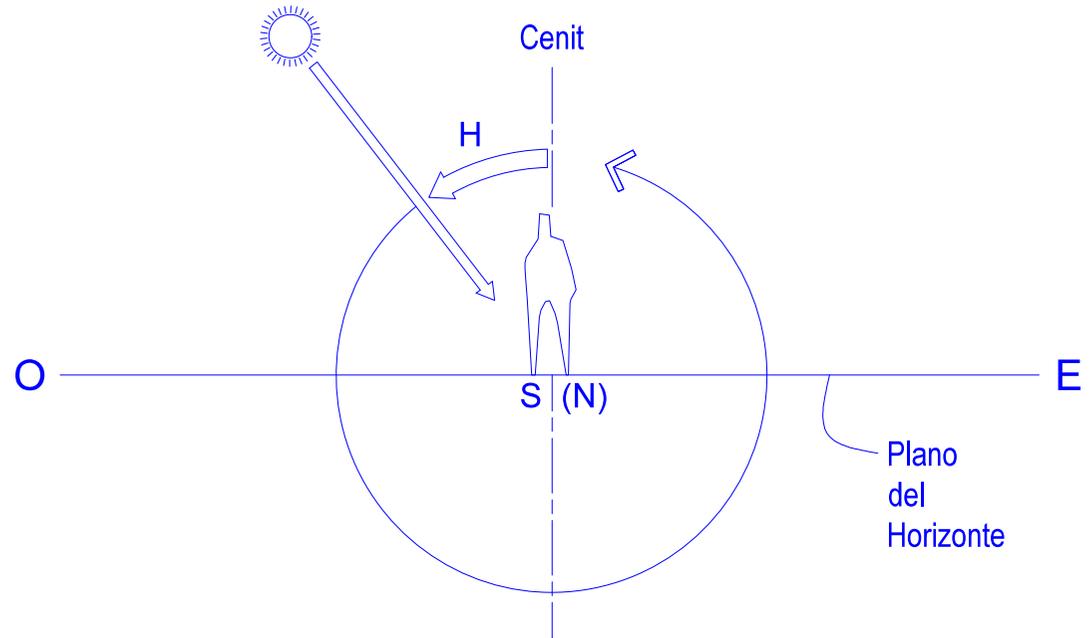


Figura 35. Ángulo horario.

Declinación solar (δ): se define como el ángulo formado por la línea imaginaria que une el centro del Sol, el centro de la Tierra y el plano del Ecuador Celeste; es por tanto la intersección del ángulo diédrico que forman el plano de la eclíptica, el plano del Ecuador solar, y el plano meridiano cuya prolongación pasa por el Sol. Para cualquier astro, a excepción del Sol, es prácticamente constante a lo largo de un año (Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985; Meeus, 1998).

De este análisis se desprende que todos los días del año tienen un homólogo-excepto los días de los solsticios- o lo que es lo mismo, que la posición de la Tierra para dos de estos días es simétrica respecto a la línea que une los puntos de los solsticios, lo que quiere decir que tiene similares valores de declinación solar. Todo esto tiene como consecuencia que los días homólogos se caracterizan por observarse iguales trayectorias solares. Este fenómeno puede ser aprovechado inteligentemente por los arquitectos y diseñadores con el fin de lograr efectos místicos en construcciones monumentales en general buscando fechas homólogas que se relacionen con un hecho, personalidad o efemérides (Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985; Meeus, 1998).

La declinación solar coincide con el ángulo formado entre los planos de la eclíptica y el plano ecuatorial del Sol. En el caso del Sol la declinación varía de $+ 23,44^\circ$ en el trópico de Cáncer correspondiente al Solsticio de

¿Sabías que?

Se estima que la energía total que absorbe la tierra en un año por medio de los océanos, los continentes y la atmósfera es aproximadamente 3850000 (1018 J) (exajulios). Si se acumula esta energía durante una hora es el equivalente al consumo global mundial de energía para el año 2002 (Wikipedia, 2012).

Verano a $-23,44^\circ$ en el trópico de Capricornio, representante del Solsticio de Invierno, siendo nula en los Equinoccios de Primavera y de Otoño (Bakulin et al., 1986; Beckers et al., 2007; Enciclopedia Salvat, 1985; Franco García, 2016; Meeus, 1998).

No obstante, la declinación solar, se puede considerar constante para pequeños intervalos de tiempo inferiores a un día, pero para cálculos precisos de incidencia solar es necesario tener en cuenta la fracción de día transcurrido, debido a que la declinación (δ) es una magnitud que varía constantemente. La obtención de la declinación solar se calcula mediante la siguiente ecuación (3) (4) (Bakulin et al., 1986; Beckers et al., 2007; Enciclopedia Salvat, 1985; Franco García, 2016; García-Badell, 1983; Meeus, 1998):

[3]

$$\delta = 23.44138889^\circ \sin \frac{(360^\circ 284 + Nd)}{365.242199074}$$

ó

[4]

$$\delta = 23.44138889^\circ \sin 0.98564733459(284 + Nd)$$

Es bueno señalar que, excepto los días de los solsticios, cada día tiene su homólogo, lo que quiere decir que tiene un mismo valor de declinación solar por lo que su trayectoria en la Bóveda Celeste Local (BCL) es la misma. Este fenómeno puede ser utilizado inteligentemente en el diseño, en caso de que para una efeméride determinada pueda coincidir otra que estén históricamente relacionadas.

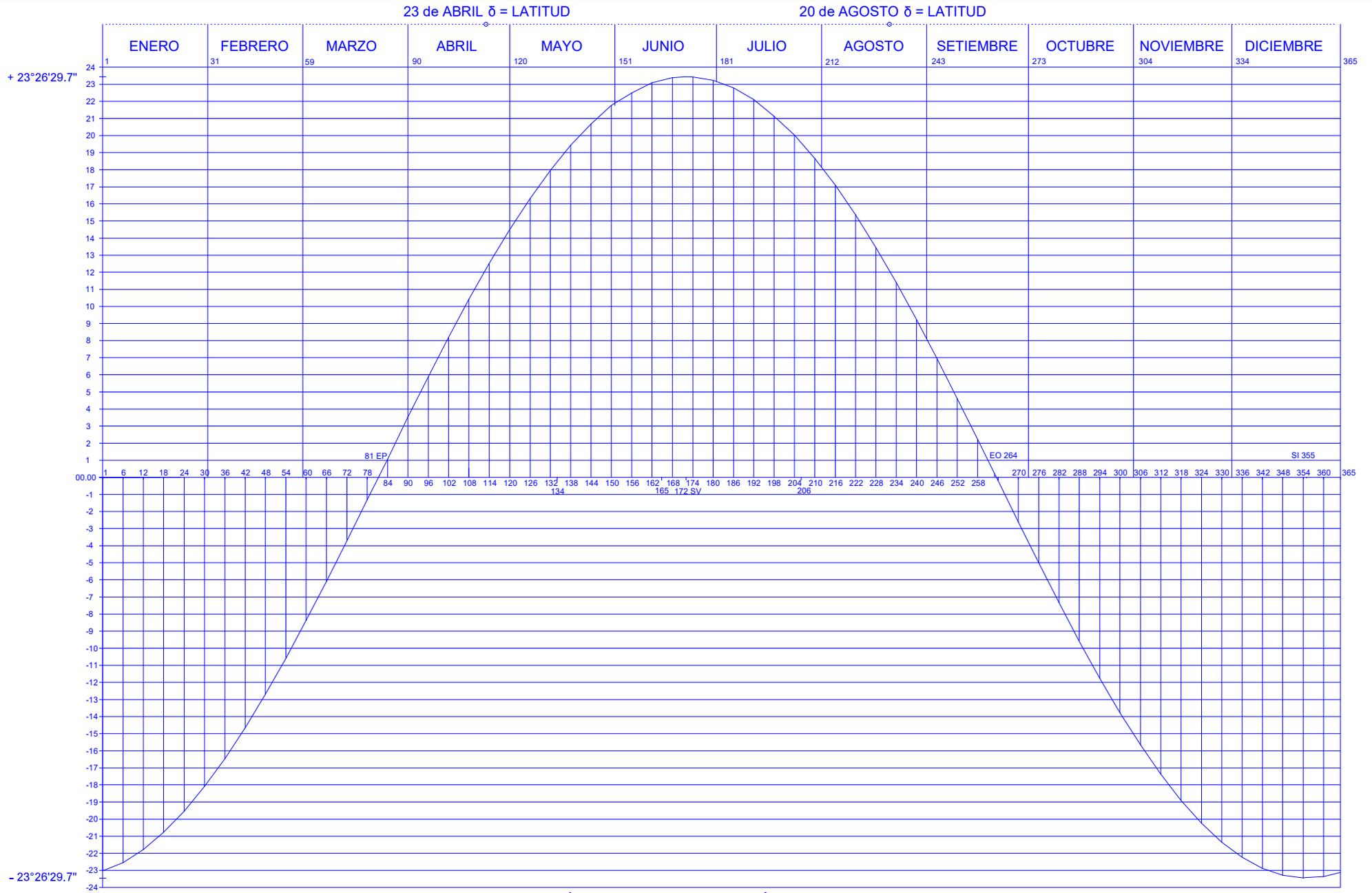


GRÁFICO DE LA DECLINACIÓN SOLAR

Figura 36. Gráfico de la Declinación Solar.

Donde:

Nd: Es el número del día del año comprendido entre el 1 (primero de enero) y el 365 (treinta y uno de diciembre). Más la fracción de día si se quiere la máxima precesión.

23,444158333°: inclinación de la eclíptica.

365,242199074: duración del año trópico en días.

La otra ecuación de la declinación solar tiene la constante 0,98564733459 que es el cociente de dividir los 360° del arco de la órbita y la duración del año trópico, es decir, el arco que recorre la Tierra durante un día en su órbita (Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985; Meeus, 1998).

Se infiere entonces que la declinación solar se mide, en términos de latitud, a partir del Ecuador hacia los trópicos en sentido positivo al Norte y negativo al Sur.

Cuando nuestro planeta se encuentra en Solsticio de Verano es porque el Sol en su movimiento aparente alcanza su mayor declinación (δ) de + 23,44° y el Sol proyecta sus rayos verticalmente sobre el trópico de Cáncer (Bakulin et al., 1986; Beckers et al., 2007; Enciclopedia Salvat, 1985; Franco García, 2016; Meeus, 1998).

¿Sabías que?

El Sol recorre aproximadamente 4° por minuto en su movimiento diario por la bóveda celeste. Por lo que en una hora el Astro Rey recorre un ángulo de 15°, y son 24 que corresponden con las horas de un día (Meeus, 1998).

En los equinoccios la declinación solar toma valor 0, esto ocurre en el instante en que la Tierra pasa por los puntos en que se cortan los planos del ecuador del Sol, y el plano de la eclíptica y los rayos de nuestra estrella inciden perpendicularmente sobre el Ecuador terrestre; por tal motivo los días de los Equinoccios el Sol sale por el Este verdadero (E) y se pone por el Oeste (O) (Bakulin et al., 1986; Beckers et al., 2007; Enciclopedia Salvat, 1985; Franco García, 2016; Meeus, 1998).

Por último, el Solsticio de Invierno ocurre cuando el Sol incide con mayor intensidad sobre el paralelo $-23,44^\circ$ que corresponde al trópico de Capricornio, este se encuentra en el hemisferio Sur o Austral, materializándose la máxima declinación negativa, es decir $-23,44^\circ$ (Figura. 36) (Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985; Meeus, 1998).

¿Sabías que?

La velocidad de rotación de La Tierra es de aproximadamente 1670 (km/h) en el ecuador, o lo que es lo mismo 465.11(m/s), valor que disminuye a medida que nos alejamos hasta que se anula en los polos (CosmoEduca, 2021).

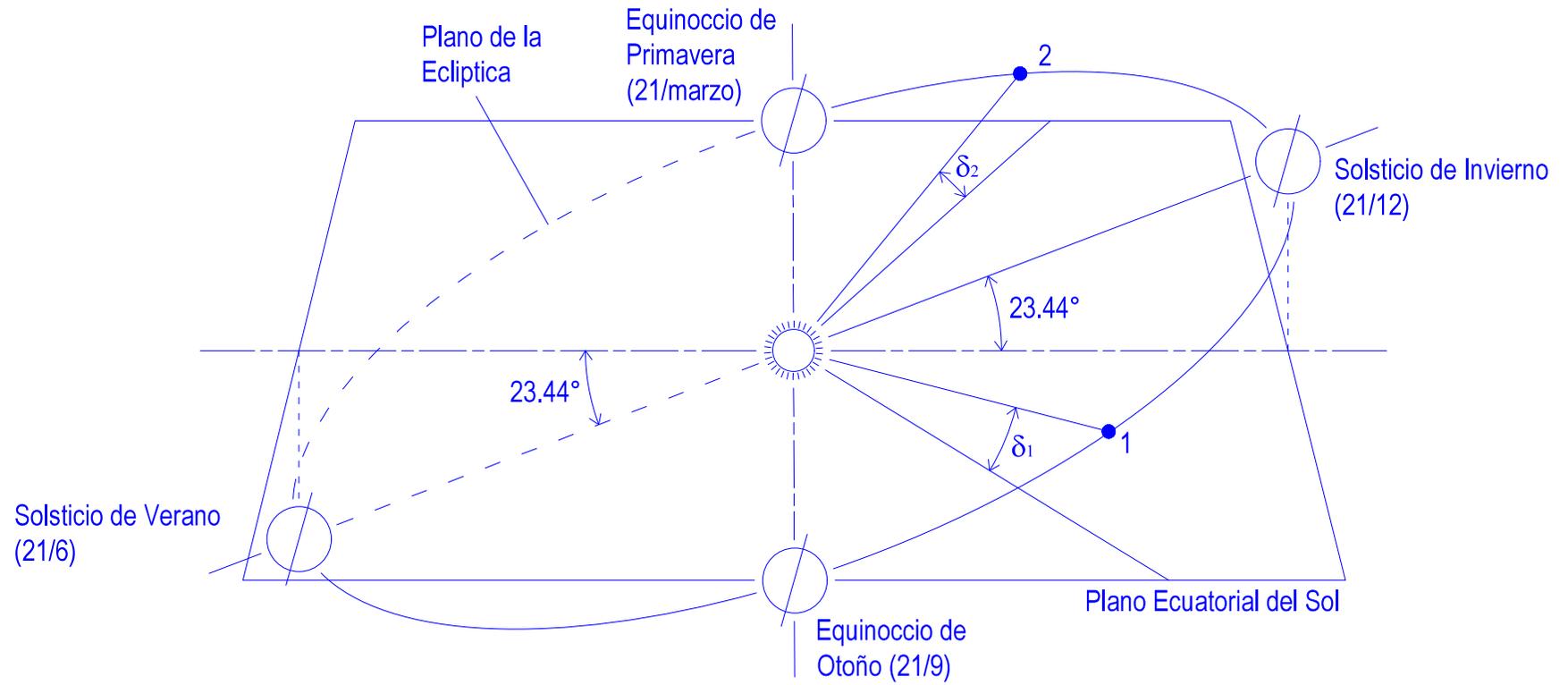


Figura 37. Traslación de la Tierra y días homólogos.

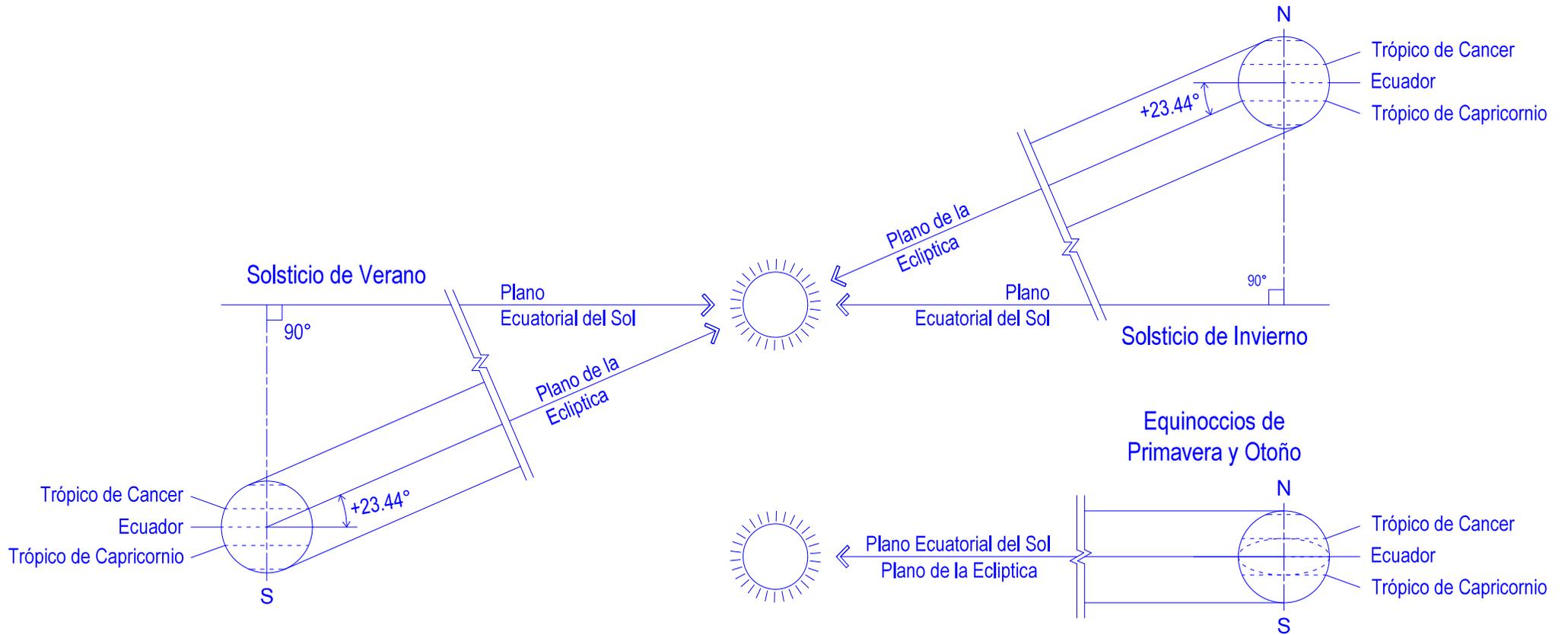


Figura 38. Las Estaciones.

Sistema de coordenadas horizontales

Ya sabemos qué son las coordenadas del sistema ecuatorial, pero con este sistema resulta complejo interpretar la posición del Sol de forma objetiva, además hay que sumarle la imposibilidad de medir estos parámetros con instrumentos corrientes usados para el replanteo en obras de arquitectura (Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985; Meeus, 1998).

Por tal motivo es necesario determinar coordenadas medibles para la realización de los trabajos de diseño o de estudios solares. Como su nombre lo indica el sistema horizontal de coordenadas está referido al plano horizontal del lugar en estudio y se expresa en los valores angulares de Acimut (A) y altura solar (h) (Figura. 36) (Enciclopedia Salvat, 1985).

La altura solar (h): es el ángulo formado por los rayos directos del Sol con el plano tangente a la superficie de la Tierra en el lugar del observador, u horizontal del lugar. Se mide de 0° a 90° en sentido positivo por encima del horizonte o negativo por debajo de este (Figura. 37) (Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985; Meeus, 1998).

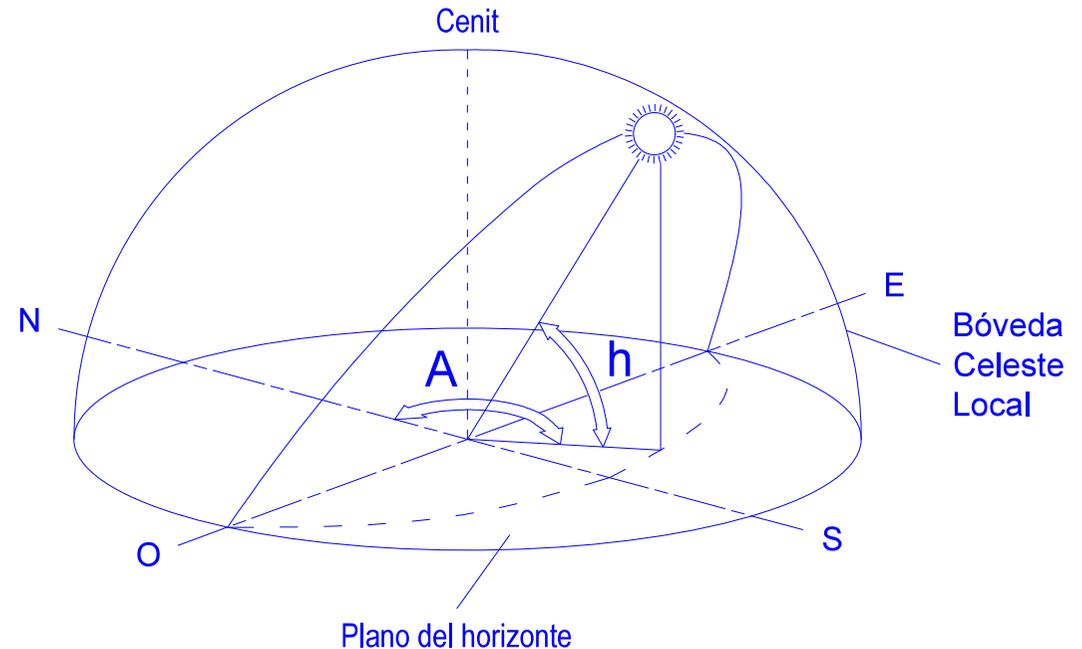


Figura 39. Sistema de Coordenadas Acimut y Altura Solar.

Se determina analíticamente mediante la ecuación:

[5]

$$\sin h = (\sin L \sin \delta) + (\cos L \cos \delta \cos H)$$

Donde:

h: altura solar.

L: latitud del lugar donde se encuentra el observador.

δ : declinación solar.

H: ángulo horario del Sol.

En el instante en que el Sol tiene un acimut igual a 0° o 180° , es decir, está en un plano orientado Norte-Sur que contiene al punto de estudio o del observador; corresponde al valor máximo de la altura solar h para el día y se denomina “altura de culminación” o “culminación solar.” Es el momento en que el Sol pasa por el meridiano del observador en cuestión consiguiendo estar al Norte del punto con acimut 0° o al Sur con acimut 180° (Figura. 37) (Bakulin et al., 1986; Beckers et al., 2007; Enciclopedia Salvat, 1985; Franco García, 2016; Meeus, 1998).

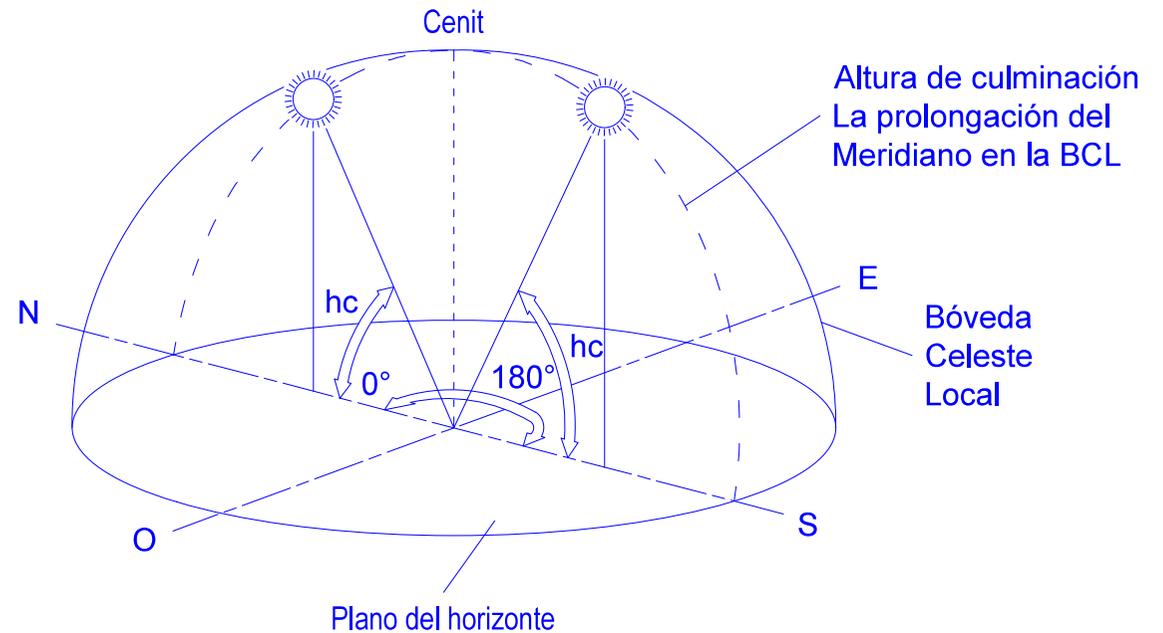


Figura 40. Altura de culminación.

La altura de culminación ocurre al mediodía solar (Figura. 40). Debido al atraso o al adelanto que en el día tiene la Tierra, en su rotación por cuestiones que posteriormente explicaremos, se dice que se observa aproximadamente al mediodía hora oficial (Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985; Meeus, 1998).

Su expresión matemática es (Beckers et al., 2007; Meeus, 1998):

[6]

$$hc = 90^\circ - L + \delta$$

Se puede expresar la hc -es el ángulo complementario de la latitud- en función de la colatitud del lugar de la siguiente forma:

[7]

$$hc = C + \delta$$

Donde:

C: la colatitud es el ángulo complementario de la latitud y se determina mediante la expresión:

[8]

$$C = 90^\circ - L$$

Acimut solar (A): es el ángulo medido sobre el plano del horizonte que forma la intersección del plano vertical meridiano que contiene al Sol y el plano meridiano del observador. Se mide desde el Norte en sentido de las manecillas del reloj (Norte a Este) de 0° a 360° ; hay que tener en cuenta que existen otros convenios de medición. Adquiere el valor $A=0$ en el instante en que el plano meridiano que contiene al Sol incluye el plano meridiano en que se encuentra

el observador, y el Sol alcanza la altura de culminación (h_c) (Bakulin et al., 1986; Beckers et al., 2007; Enciclopedia Salvat, 1985; Franco García, 2016; Meeus, 1998).

Se determina el acimut solar (A) en un tiempo dado de la forma siguiente (Lacomba et al., 1991; Meeus, 1998):

[9]

$$\cos A = \frac{(\sin \delta - \sin L \sin h)}{\cos L \cos h}$$

O lo que es lo mismo:

[10]

$$A = \arcsin \frac{(\sin \delta - \sin L \sin h)}{\cos L \cos h}$$

Si la hora solar es >12 se suman 180° al valor que da esta ecuación.

Donde:

A: acimut solar.

δ : declinación solar.

L: latitud del lugar en estudio.

h: altura solar.

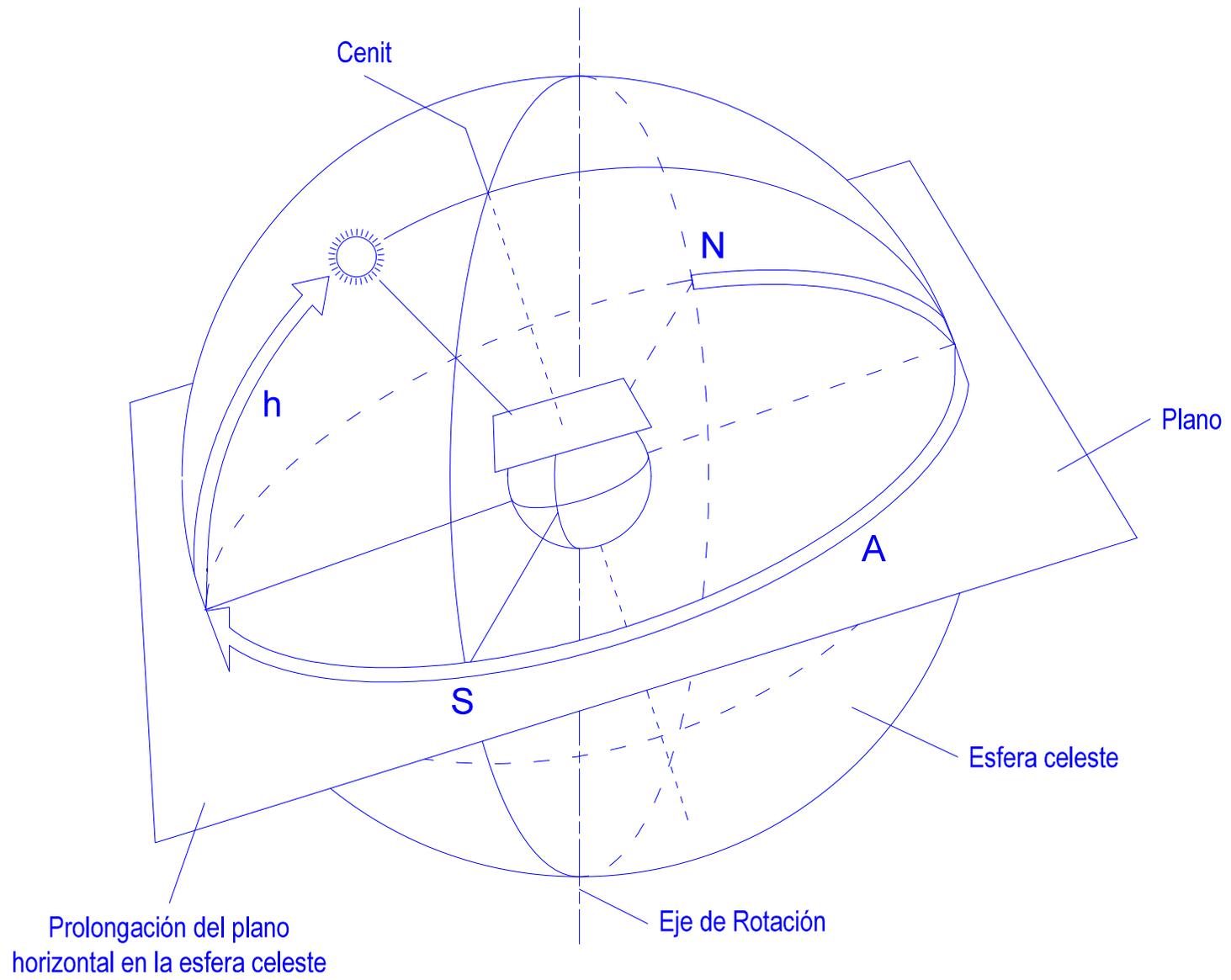


Figura 41. Sistema horizontal de coordenadas.

Corrección horaria

Para cualquier habitante común de la Tierra todos los días tienen 24 horas o lo que es lo mismo el Sol tarda 24 horas en pasar consecutivamente dos veces por un mismo meridiano de un lugar determinado; sin embargo, lo que sucede realmente es que nuestro planeta está sometido a la acción gravitatoria del Sol, de la Luna y de los demás planetas del sistema solar, fundamentalmente Júpiter, gigante de nuestro sistema planetario. Además, su forma no esférica y la acción de las mareas producen en general afectaciones en su movimiento; por lo que nuestro planeta se adelanta y se atrasa en virtud de los factores antes señalados (Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985; Franco García, 2016; Lacomba et al., 1991; Meeus, 1998; Ministerio del Transporte, 2020).

El adelanto y el atraso diario de la Tierra es un parámetro muy importante a tener en cuenta cuando se analizan las correcciones horarias. Este parámetro se denomina Ecuación de Tiempo (E_t) (Figura. 42) y se determina con la expresión siguiente (Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985; Franco García, 2016; Lacomba et al., 1991; Meeus, 1998):

[11]

Donde:

Nd: es el número de día del año (1 a 365 días). Que puede ser sustituido por t cuando se hacen cálculos precisos.

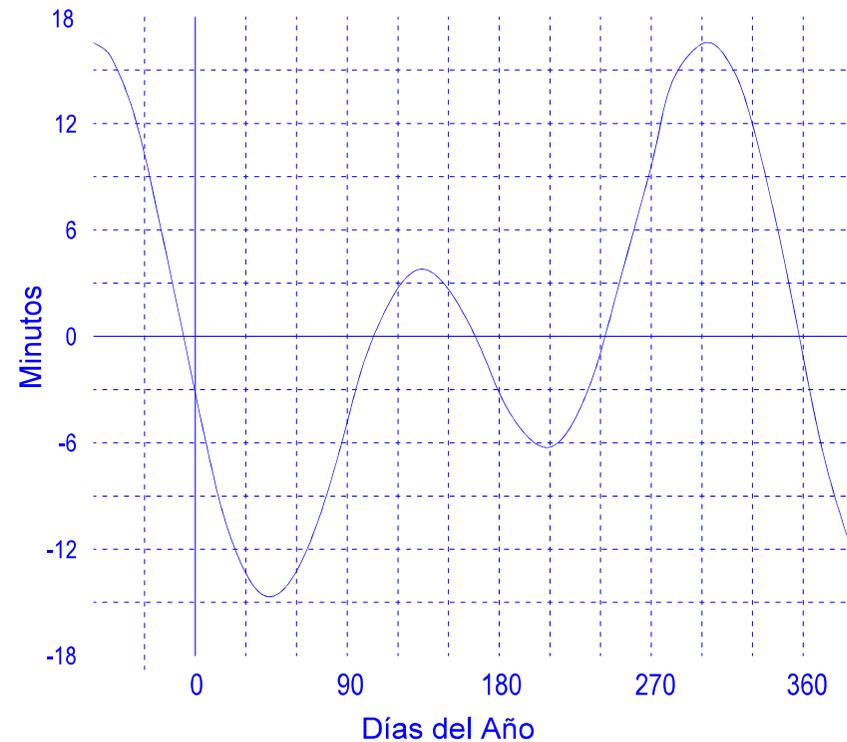


Figura 42. Gráfica de Tiempo.

$$E_t = 9.87 \sin \frac{360^\circ(Nd - 81)}{182} - 7.53 \cos \frac{360^\circ(Nd - 81)}{364} - 1.5 \sin \frac{360^\circ(Nd - 81)}{364}$$

El tiempo t se expresa en horas puede ser utilizado tanto para el cálculo del ángulo horario como para cualquier otro parámetro relacionado con la radiación solar. Esto ocurre porque la hora oficial se mide respecto a un meridiano de referencia (Figura. 43).

En la República del Ecuador, por citar un ejemplo, existen dos husos horarios, uno que está dado para el Ecuador continental (GT-5 que coincide con el meridiano 75°W) y otro para las Islas Galápagos (GT-6 que corresponde con el meridiano 90°W) (Figura.43). La primera corrección está dada por la diferencia de longitudes entre los meridianos (el de referencia y el del observador), a consecuencia de la velocidad con que el Sol recorre un 1° de longitud cada 4 minutos, o lo que es lo mismo, una hora por cada 15° , siendo positivo hacia el Este y negativo hacia el Oeste.

En Ecuador, a diferencia de otros países ubicados alejados del ecuador terrestre, no existe la necesidad de implementar el horario de verano, para así tratar de aprovechar mejor la iluminación y ahorrar energía. Para países que, si aplican el horario de verano, es necesario tener previsto este adelanto de la hora en el momento de los cálculos solares (dateandtime.info, 2012).

¿Sabías que?

La Luna es la principal responsable de las mareas en nuestro planeta, la fuerza de gravedad provocada, por su masa y su cercanía, hace que el nivel del mar aumente o disminuya periódicamente, este efecto se nota con claridad en las costas más llanas, ejemplo: las playas (Pianzola, 2014).

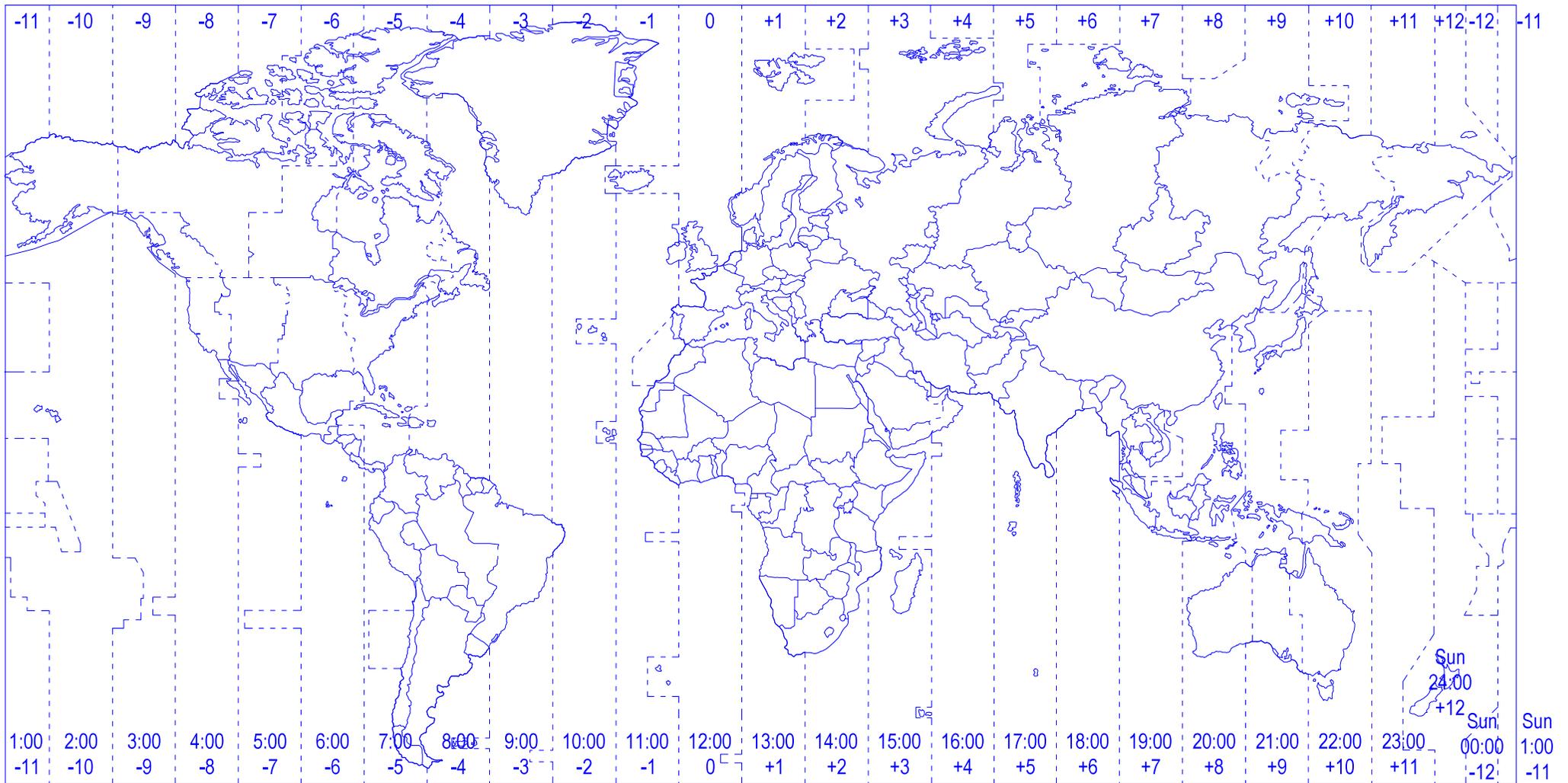


Figura 43. Mapa mundial de husos horarios.

Consideramos en nuestro proceso de cálculo el “Tiempo t” como el instante preciso del año en que se van a determinar las coordenadas solares, esto es, los días transcurridos desde el primero de enero hasta la hora y fracción de día. Este “Tiempo t” se calcula mediante el proceso siguiente (Meeus, 1998):

[12]

$$\lambda_{horas} = \frac{4\lambda^{\circ}}{60}$$

[13]

$$Tu = \lambda_{local} - \lambda_{horas}$$

[14]

$$t = Nd + \frac{Tu}{24}$$

Donde:

λ horas: la longitud del lugar expresa en medida horaria (con signo negativo si λ está al Oeste del Meridiano de Greenwich).

Tu: medida horaria en tiempo universal. T local: hora local en que se quiere determinar un fenómeno específico, efecto o coordenada.

λ° : longitud. Este es el tiempo que se utiliza en las ecuaciones de declinación δ y ecuación de tiempo sustituyendo al valor Nd. Esta sustitución nos brinda el cálculo exacto pues t tiene en cuenta el número del día y la fracción de ese día.

Por tanto, la hora solar se calcula según la fórmula (Meeus, 1998):

[15]

$$HoraSolar = HoraOficial + 4(l) + Et + a$$

Donde:

La hora oficial: es aquella por la que se rige el país y se refiere a un meridiano dado que puede pasar por un territorio.

Los términos de esta ecuación se suman algebraicamente, con el signo de cada parámetro.

Para la mejor comprensión de este fenómeno se ha creado “el Analema” (Figura. 44 y 45), gráfico que muestra el comportamiento del Sol en el término de un año teniendo en cuenta dos aspectos: en el eje horizontal se analiza la ecuación de tiempo (Et) con su adelanto y atraso, y en el sentido vertical de las ordenadas se analiza la declinación solar (d) que oscila entre $+23,44^\circ$ hasta $-23,44^\circ$ (Bakulin et al., 1986; Enciclopedia Salvat, 1985; Meeus, 1998).

Como se puede observar, el proceso de cálculo de las coordenadas solares es largo y complejo por tener gran cantidad de pasos y ecuaciones que lo hacen difícil; es por ello que, utilizando el programa de cálculo que se pretende adjuntar en el futuro en este libro se facilitan considerablemente estos cálculos; con ello se rompe la barrera entre las intenciones de diseño y el complejo proceso de cálculo; logrando dar rienda suelta a la imaginación del arquitecto y cualquier interesado en cuestiones de posición del Sol.

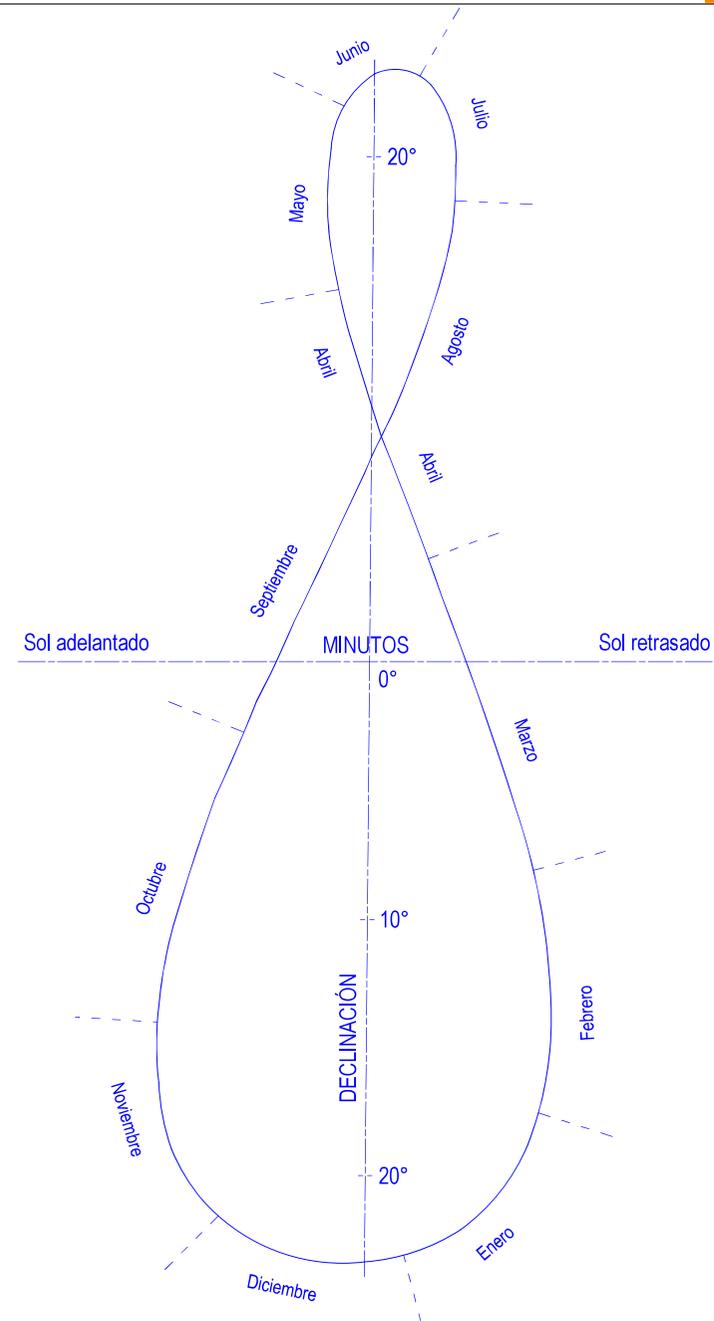


Figura 44. Analema.

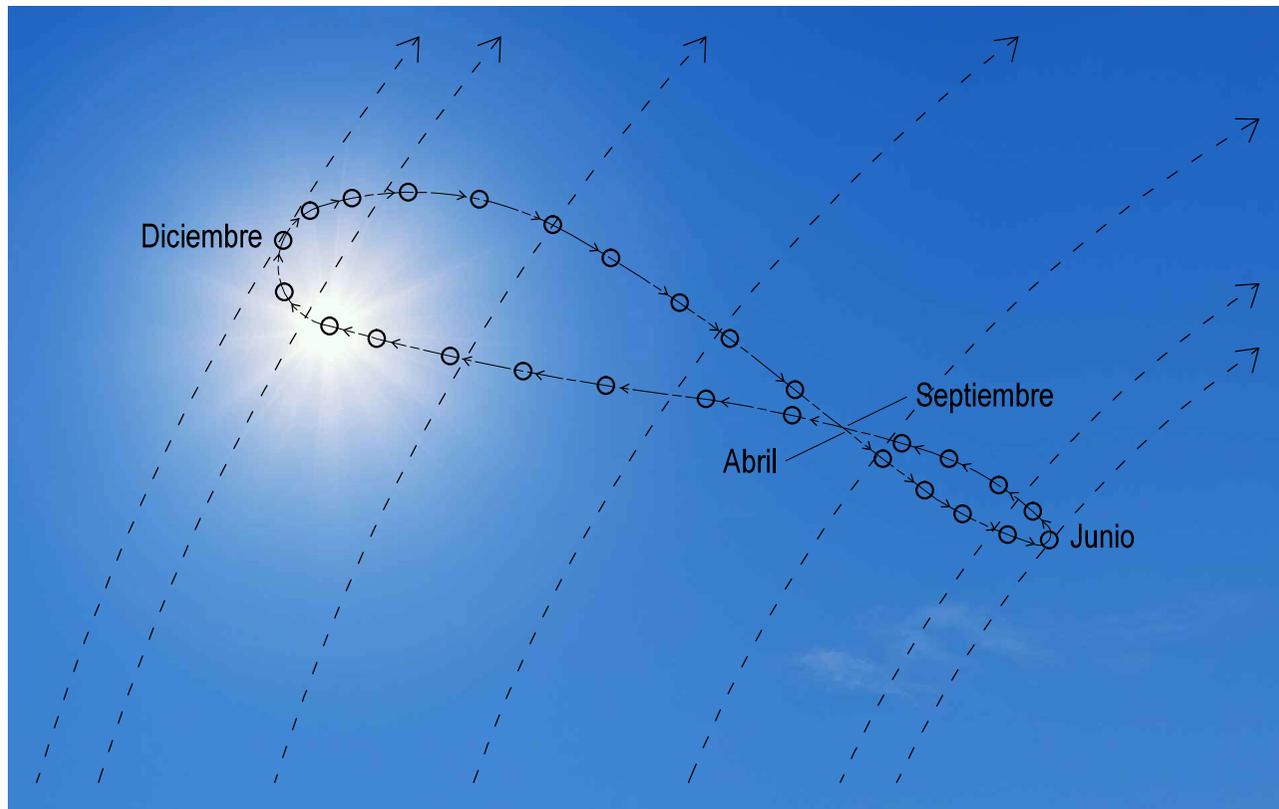
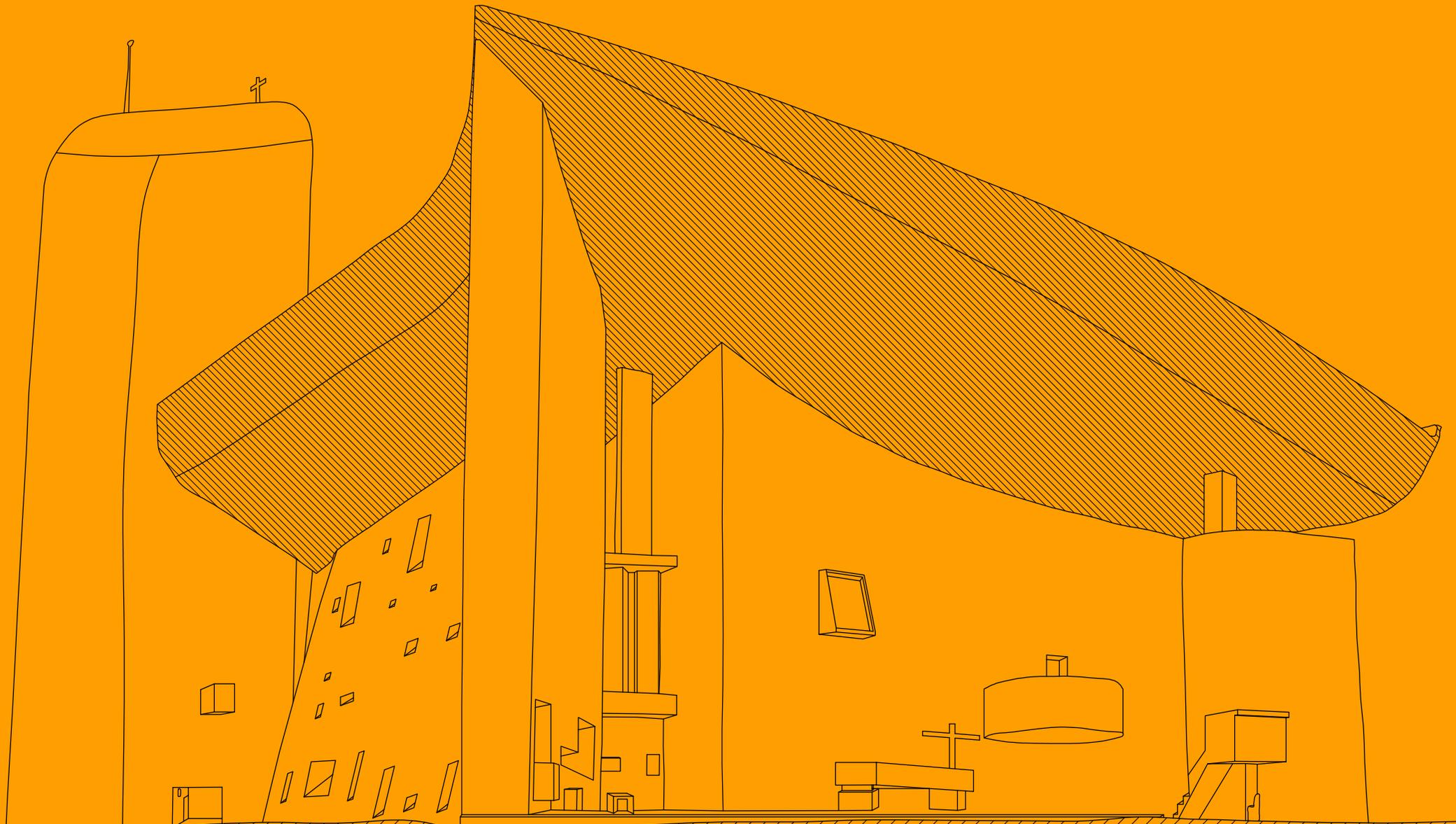


Figura 45. Fotomontaje ficticio del Analema mostrando el recorrido anual del Sol para una misma hora.

**PARTE 3.
EJEMPLOS
DE
CÁLCULOS**



PARTE 3. EJEMPLOS DE CÁLCULOS

Capilla Notre Dame du Haut Ronchamp, Francia.

PARTE 3. EJEMPLOS DE CÁLCULOS

Ejercicio 1. Ejemplo de cálculo solar para la Latitud $20^{\circ}00'00''$ N

Con el objetivo de demostrar la utilización de las distintas fórmulas y ecuaciones planteadas en la Parte 2, expondremos con un problema hipotético ejemplo que evidencia como se debe proceder con estas fórmulas y ecuaciones.

Ejercicio 1: Determinar la posición de la sombra sobre el plano horizontal de un punto P que se encuentra situado a 100mm de altura en las siguientes coordenadas geográficas:

Latitud: $20^{\circ}00'00''$ N
 Longitud: $76^{\circ}57'25,92''$ W

El instante en que se quiere determinar la sombra es a las 13 horas, 30 minutos del día 13 de marzo del año 2000. El meridiano de referencia de la hora es el cero (Greenwich) (Figura 46 y 47).

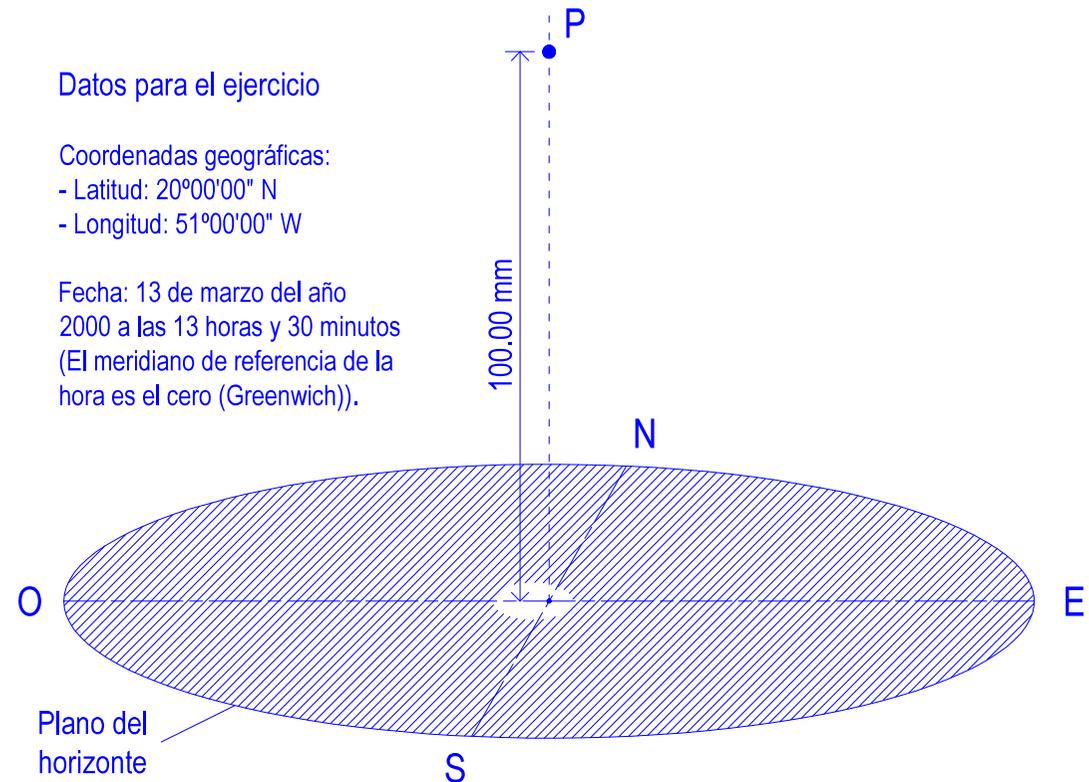


Figura 46. Parámetros del Ejercicio.

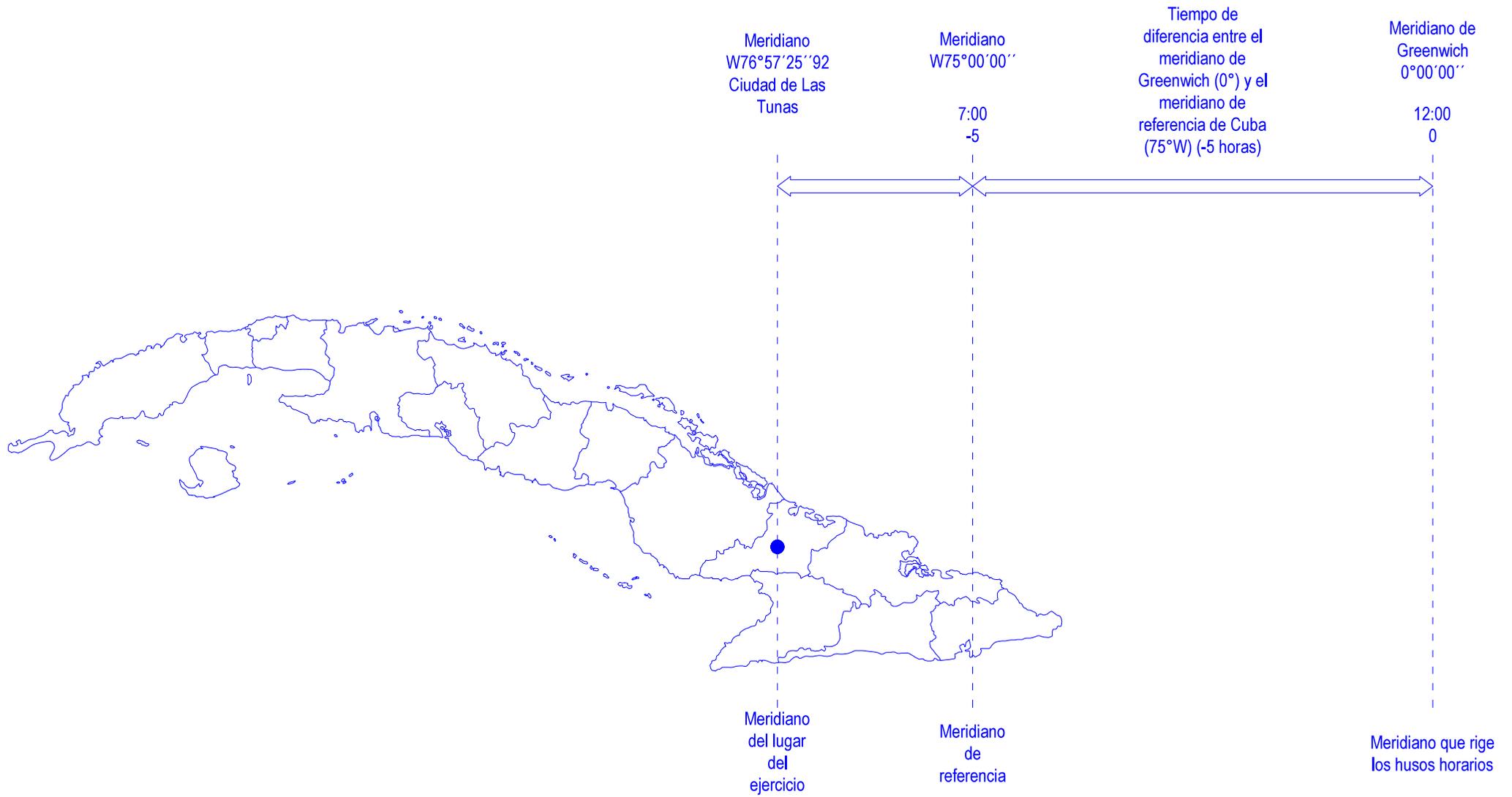


Figura 47. Huso horario para Cuba. Condiciones o ubicación del caso de estudio.

Como primer paso se calcula el tiempo en la hora oficial (t) que se determina de la siguiente forma (Meeus, 1998):

[16]

$$t = Nd + \frac{Tu}{24}$$

Donde:

Nd será el número de día en que se quiere hacer el estudio, por tanto:

[17]

$$Nd = 31 \text{ días} + 29 \text{ días} + 13 \text{ días}$$

(enero – febrero - marzo)
(Bisiesto)

[18]

$$Nd = 73 \text{ días}$$

Y el tiempo universal (Tu) se determina:

[19]

$$Tu = \lambda_{local} - \lambda_{horas}$$

Donde:

[20]

$$\lambda_{local} = \frac{4\lambda}{60} = \frac{-4(5^{\circ}00'00''00 - 0^{\circ})}{60}$$

Teniendo en cuenta que:

[21]

$$\lambda^{\circ} = \text{longitud} - \text{longitud de referencia}$$

[22]

$$\lambda \text{ horas} = 0.33 \dots h$$

Por tanto:

[23]

$$Tu = 13.5 \text{ h} - (-0.33 \dots h) = 13.8333 \dots h$$

Entonces:

$$[24] \quad t = 73 \text{ días} + \frac{13.8333...h}{24} = 73.5764 \text{ días}$$

Este tiempo (t) está dado en hora oficial y se utiliza para calcular la ecuación de tiempo (Et) que nos brinda el atraso o adelanto que tiene el día para el cálculo de la ecuación horaria.

$$[25] \quad Et = 9.87 \sin \frac{360^\circ (Nd - 81)}{182} - 7.53 \cos \frac{360^\circ (Nd - 81)}{364} - 1.5 \sin \frac{360^\circ (Nd - 81)}{364}$$

$$[26] \quad Et = \frac{-9.7785 \text{ min}}{60} = -0.162975 \text{ h}$$

Con el resultado de la ecuación de tiempo nos percatamos que la Tierra posee un atraso de 9,78 minutos y con estos datos calculamos la hora solar.

$$[27] \quad \text{Hora Solar} = \text{Hora Oficial} + 4(l) + Et + a$$

$$[28] \quad \text{Hora Solar} = 13.8333 \text{ h} + \frac{4(-5-0)}{60} + \frac{-9.7785 \text{ min}}{60}$$

Que corresponde a:

$$[29] \quad \text{Hora Solar} = \frac{13.3370}{24} = 0.5557 \text{ días}$$

La división entre 60 en la ecuación de la Hora Solar es para llevar a horas todos los datos y la división entre 24 para expresar el resultado de la Hora Solar en fracción de día. De esta forma se puede calcular el tiempo (t) para el cual se calcularán las coordenadas.

[30]

$$t = Nd + \text{Hora Solar}; (\text{fracción de días en horas})$$

[31]

$$t = 73 \text{ días} + 0.5557 \text{ días} = 73.5557$$

Con el tiempo t se calculan las coordenadas del sistema ecuatorial, es decir, por la declinación solar (δ) y el ángulo horario (H). Como el valor de coordenadas que se calculará será para las 13:30 se toma la siguiente ecuación.

[32]

$$H = 15(td - 12) \text{ y como : Hora Solar (en horas)}$$

[33]

$$H = 15(13.3370 - 12) = 20.055^\circ$$

Y la declinación solar se obtiene:

[34]

$$\delta = 23.44138889^\circ \sin \frac{(360^\circ 284 + t)}{365.242199074}$$

[35]

$$\delta = 23.44138889^\circ \sin \frac{(360^\circ 284 + 73.555 \text{ días})}{365.242199074}$$

[36]

$$\delta = 3.090012212^\circ = 3^\circ 05' 20.2''$$

Para determinar la sombra no basta con estas coordenadas, hay que calcular la altura solar y el acimut, es decir las coordenadas del sistema horizontal. Con este sistema de coordenadas se logra un análisis particular y fácil de replantear en obras de arquitectura:

El cálculo del acimut solar:

$$[37] \quad \cos A = \frac{(\sin \delta - \sin L \sin h)}{\cos L \cos h}$$

$$[38] \quad \cos A = \frac{(\sin(-3.090612212^\circ) - \sin(20^\circ 00') \sin(64.1846998^\circ))}{\cos(+20^\circ 00' 00'') \cos(64^\circ 10' 53''.2)}$$

$$[39] \quad \cos A = \frac{0.222231273043}{0.409257042} = 0.565104613$$

$$[40] \quad A = \arcsin 0.565104613 = 55.590444383 + 180^\circ$$

$$[41] \quad A = 235.5904438^\circ = 235^\circ 35' 25''$$

Al valor del acimut solar se le añade 180° por ser la hora solar >12 .

Determinación de la altura solar:

$$[42] \quad \sin h = (\sin L \sin \delta) + (\cos L \cos \delta \cos H)$$

$$[43] \quad \sin h = (\sin(20^\circ 00' 00''.0) \sin(-3.090612212^\circ)) + (\cos(20^\circ 00') \cos(-3.090612212^\circ) \cos(20.055^\circ))$$

[44]

$$h = \arcsin(0.900177966^\circ)$$

[45]

$$h = 64.18146998^\circ = 64^\circ 10' 53''.20$$

Para el cálculo del acimut de la sombra se le restan en este caso 180° ya que la sombra se proyecta en dirección opuesta a la incidencia solar:

[46]

$$A_{sombra} = A - 180^\circ$$

[47]

$$A_{sombra} = 235.5904438^\circ - 180^\circ$$

[48]

$$A_{sombra} = 55.5904438^\circ$$

Con vistas a determinar a qué distancia del punto se proyecta la sombra en un plano horizontal procedemos de la siguiente forma:

Sea P el punto proyectante de sombra que se encuentra a 100 mm de altura según los datos del problema conociendo la altura solar ($h = 64,18146998^\circ$).

Las coordenadas de la sombra: $55,590443^\circ$ de acimut y 48,38 mm de longitud (Figura. 48).

Nos podemos percatar que el cálculo de las coordenadas solares es complejo, de esta forma se hace realmente difícil hacer un estudio solar de precisión para una determinada región. Debido a esto se anexará en el futuro, el software con el propósito de hacer todos estos largos y tediosos cálculos de manera rápida y con la posibilidad de impresión de las tablas y de los gráficos solares y sombrigramas; dedicado exclusivamente para arquitectos o expertos afines que estén interesados en aplicar la iluminación solar con fines simbólicos, de manera tal que forme parte de un compendio que le brinde a este profesional soñador y sensible un material de inigualable valor y utilidad.

El método analítico, descrito mediante estos ejemplos de cálculo, resume todos los pasos para poder determinar la posición solar, o lo que es lo mismo, la dirección del rayo de luz del Sol para utilizar con fines simbólicos y místicos en la arquitectura. Se puede declarar de forma concluyente, que, si existe la comprensión del método de cálculo, entonces el profesional está capacitado para aplicarlo en sus diseños.

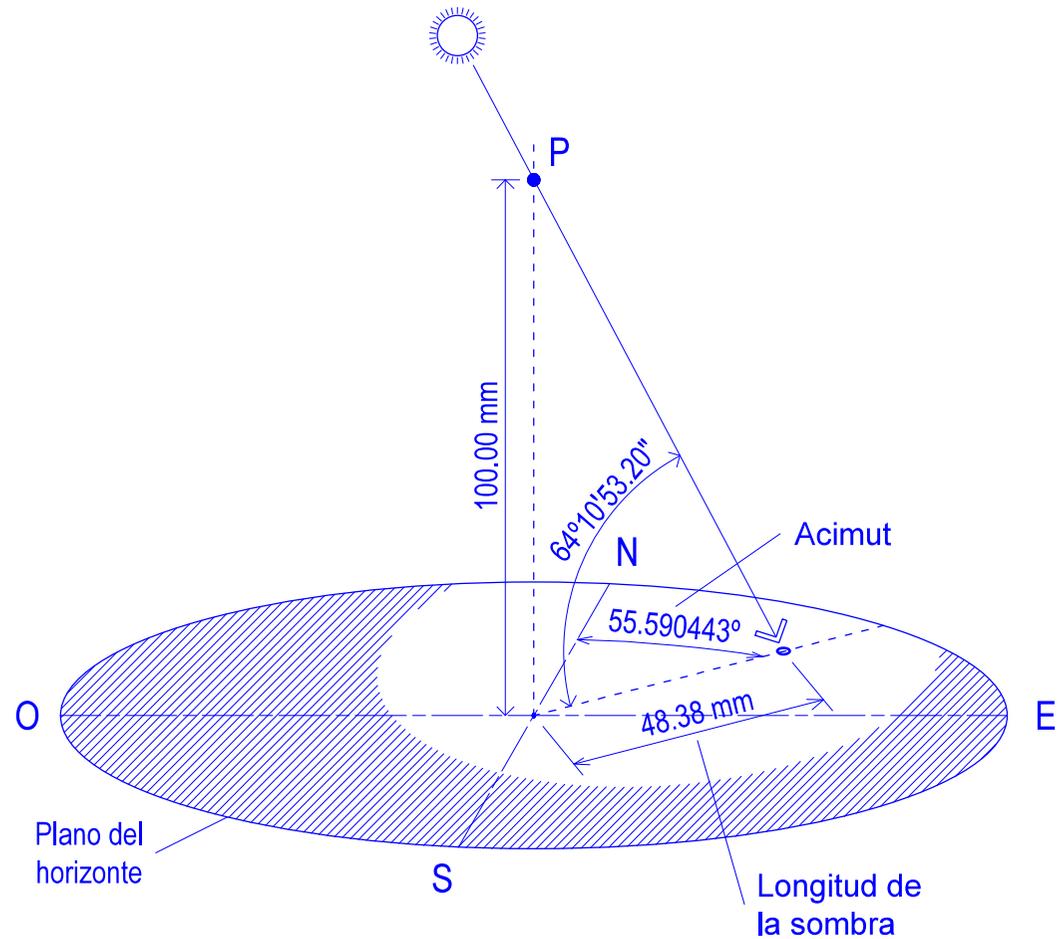


Figura 48. Resultado del Ejercicio.

PARTE 3. EJEMPLOS DE CÁLCULOS

Ejercicio 2. Ejemplo de cálculo solar para Latitud 00°00'00"

Problema: Se desea lograr un efecto con la luz del Sol que ocurra anualmente para conmemorar el aniversario de La Fundación de Quito los días 6 de diciembre de cada año a la hora de la culminación solar. Se pretende que la luz procedente del Astro Rey atraviese una perforación con la forma de La Cruz del Tiempo, símbolo indiscutible de la Civilización Inca, hecha en una superficie dada y se proyecte sobre otra cruz similar representada en otra superficie cercana y paralela a la primera.

El dispositivo solar será ubicado en las inmediaciones de una parcela al este de la ciudad de Quito que se llama "El Vértice Latitud Cero" en las siguientes coordenadas geográficas:

Latitud: 00°00'00"

Longitud: -78°00'00"

Meridiano de referencia que rige la hora en Ecuador: 75°00'00" de longitud oeste.

Inciso a.-Teniendo en cuenta que el dispositivo se encuentra en una latitud notable (00°00'00") proponga un diseño simple para la creación de un monumento conmemorativo en donde se determinen los ángulos de inclinación y en general, la ubicación espacial de esas

superficies para que el fenómeno ocurra durante el paso del sol por el meridiano en cada aniversario de La Fundación de Quito.

Determine entonces, con los datos que se aportan en este problema, todos los parámetros que hay que calcular para lograr el efecto solar.

Inciso b.- Si se deseara que el efecto ocurriera a las 09:00 horas de ese mismo día y en el mismo lugar de ubicación ¿cómo sería la nueva orientación del monumento, así como la inclinación de las superficies perforada y lisa?

A continuación, se muestra un esquema que representa la idea del efecto que se desea lograr en el caso del inciso "a".

En el caso del inciso "b" los elementos componentes de este sistema se mantendrán, pero, como es lógico, se cambiarán los ángulos de inclinación de las superficies, así como su orientación con relación a la solución del inciso "a".

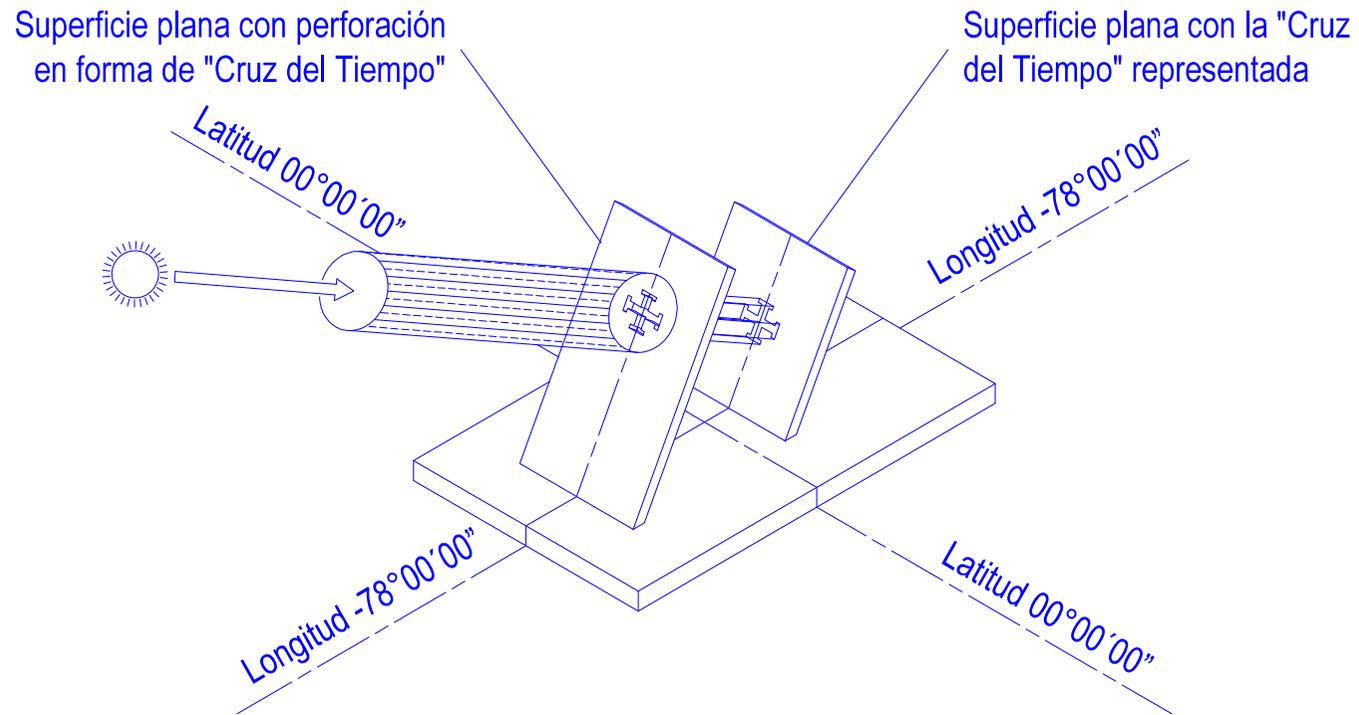


Figura 49. Ilustración gráfica del efecto que se desea lograr en el caso del inciso "a".

Solución del inciso “a”

Comencemos el proceso de cálculo y diseño del dispositivo solar.

Como hemos expresado en este texto, la fecha, que es imprescindible para los cálculos astronómicos, se expresa en forma de días consecutivos en el año más la fracción de día (Nd) que transcurre hasta la hora exacta en que se va a realizar el cálculo y utilizamos la ecuación del Nd sumándole la fracción de día.

Calculemos primero la fracción de día teniendo en cuenta que la hora solar cuando el Sol pasa por el meridiano de un lugar específico es 12:00:00 por lo que el término “m” de la ecuación se hace cero ya que se trata de una hora entera.

[49]

$$Fd = h + \frac{m}{60} - \frac{\Delta M}{15}$$

Donde:

Fd: es la fracción de día expresada en horas.
h: es la hora en cuestión.

m: es parte de la hora expresada en minutos que al dividirse entre 60 da la fracción de hora.

ΔM : es la diferencia entre el meridiano estudiado respecto al meridiano cero o de Greenwich.

Sustituyendo los valores en la ecuación queda:

[50]

$$Fd = 12 + \frac{0}{60} - \frac{0^\circ - 78^\circ}{15^\circ} = 17.20 \text{ horas}$$

Este resultado significa que habrán transcurrido 17.20 horas desde que el Sol pasó por el Meridiano 00°00'00" (Greenwich) hasta que pasó por el meridiano -78° del lugar objeto de estudio; por tanto, si dividimos esas 17,20 horas entre 24 horas que tiene el día obtendremos definitivamente la fracción de día que en este caso es:

[51]

$$Fd = \frac{17.20}{24} = 0.7166$$

Determinemos ahora el Nd:

[52]

$$Nd = \sum d (\text{enero} \rightarrow \text{diciembre})$$

[53]

$$Nd = 31 + 28 + 31 + 30 + 31 + 30 + 31 + 31 + 30 + 31 + 30 + 6$$

[54]

$$Nd = 340.7166$$

Ahora debemos de determinar otro parámetro solar que es imprescindible para nuestros cálculos que es la declinación solar (δ).

[55]

$$\delta = 23.4415833333 \sin \frac{360}{365.242199074} (284 + Nd)$$

Sustituyendo el valor calculado de Nd en la ecuación de la declinación solar tenemos el siguiente resultado:

[56]

$$\delta = -22.72033248 = -22^{\circ}43'13.20''$$

Es bueno comentar que este valor de la declinación solar calculado para un instante del 6 de diciembre debe de estar cercano a los -23°26'29.70" que es el correspondiente a la declinación en el solsticio de invierno para el hemisferio norte, por lo que el resultado obtenido es lógico porque solo difiere en 00°43'16,5".

Ahora bien, con este valor calculado de la declinación podemos obtener la altura de culminación solar para el día que estamos estudiando y usaremos la ecuación correspondiente:

[57]

$$H_c = 90^\circ - \theta + \delta$$

Siendo, ϕ la latitud y δ la declinación solar.

Como ya hemos expresado en este texto, la expresión $90^\circ - \phi$ para un punto dado de la Tierra es fijo y se llama colatitud que es el ángulo complementario de la Latitud. En el caso de la Línea Ecuatorial, como el valor de la latitud es nula o cero, entonces la colatitud adquiere el valor notable de $90^\circ 00' 00''$, de manera que en esta situación la altura de culminación solar para un día o instante determinado en cualquier punto de la Línea Ecuatorial, independientemente del país o zona en que se encuentre, siempre será el resultado de restar a $90^\circ 00' 00''$ el valor de la declinación solar quedando la ecuación de la siguiente manera:

[58]

$$H_c = 90^\circ + \delta$$

Hay que tener muy en cuenta que los valores de declinación solar pueden ser positivos o negativos y hay que introducirlos en la ecuación con su correspondiente signo, de lo contrario el resultado sería equívoco.

Entonces para la efeméride del 6 de diciembre resolvemos una buena parte del problema con una suma algebraica muy sencilla.

[59]

$$Hc = 90^\circ + (-22^\circ 43' 13.20'')$$

[60]

$$Hc = 90^\circ - 22^\circ 43' 13.20''$$

[61]

$$Hc = 67^\circ 16' 46.80''$$

Teniendo determinada la altura de culminación debemos recordar:

Que los rayos solares en ese instante proceden del sur franco por lo que el acimut solar en ese momento es de $180^\circ 00' 00''$ y se infiere que las superficies que componen nuestro dispositivo solar conmemorativo deben de estar orientadas estrictamente al sur de manera que sus bordes laterales señalen hacia el este y el oeste respectivamente.

De todo esto inferimos que tanto la superficie perforada, como la que recibirá los rayos solares para iluminar la representación de La Cruz del Tiempo, han de estar ubicadas perpendicularmente a los rayos solares a la hora y fecha establecida por lo que en este caso el ángulo que deben de formar con relación al plano horizontal será de $22^\circ 43' 13.20''$ que es el ángulo complementario que se obtiene al sustraer de $90^\circ 00' 00''$ el ángulo de la altura de culminación solar, esto es, desde el punto de vista del diseño, dar una pendiente a la superficie perforada similar a la de un plano perpendicular al ángulo de la incidencia solar calculada. Un posible diseño que responda al problema planteado en el inciso "a" puede ser lo que se representa a continuación:

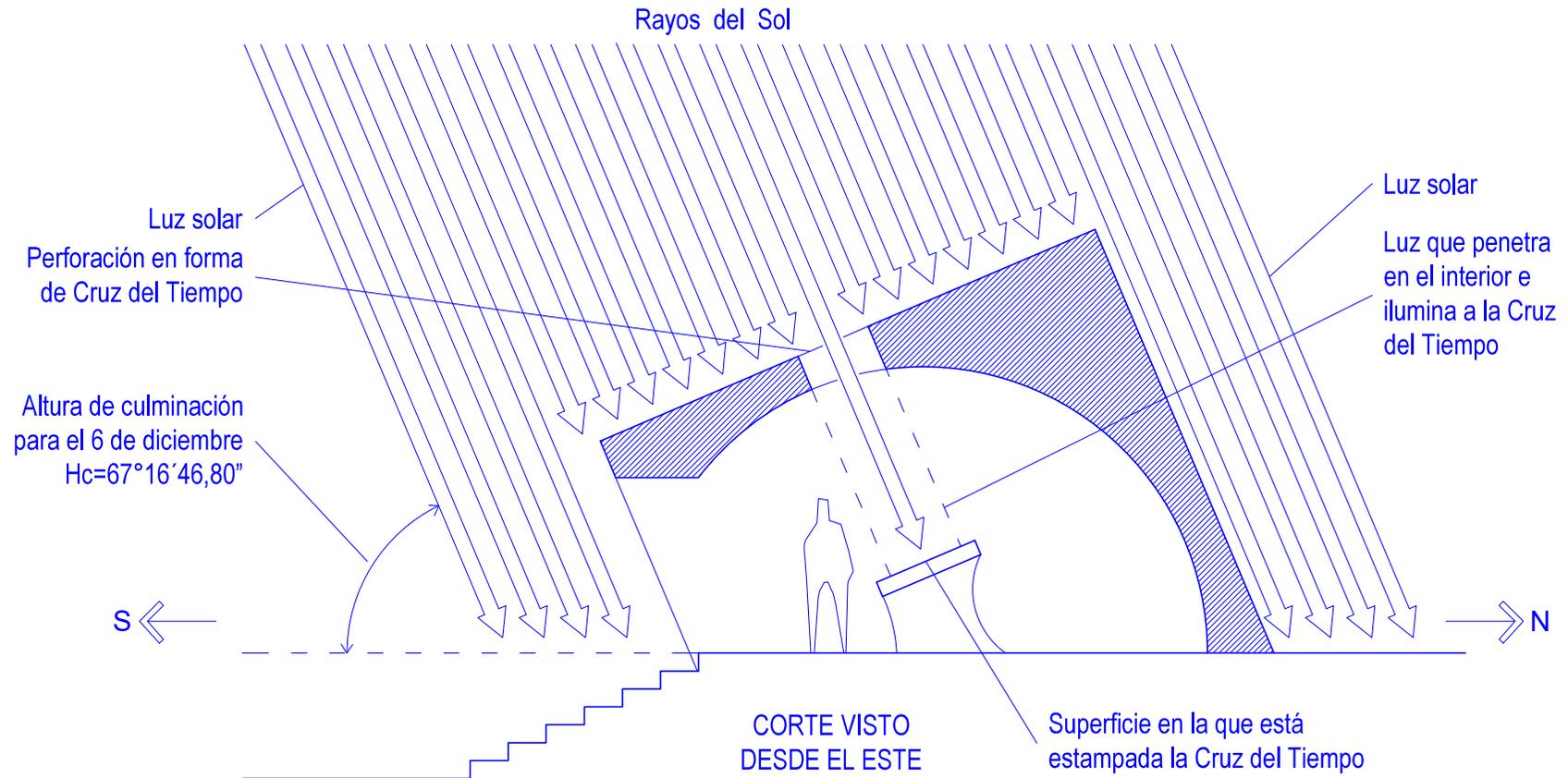


Figura 50. Diagrama muestra cómo la inclinación de los rayos solares en el momento de la culminación tiene un ángulo inclinado hacia el sur de $67^{\circ}16'46,80''$ respecto al plano horizontal. La cubierta perforada es perpendicular a la dirección de dichos rayos solares. Una vez conocidas la forma, dimensiones y proporciones de lo que será el espacio, comienza el proceso de concepción de la construcción propiamente dicha y demás detalles del proyecto arquitectónico.

Hemos visto que la altura de culminación se puede usar para diseñar con una significativa economía de cálculo, por lo que las predicciones solares son también fáciles si se tiene previamente calculada la declinación solar. Como se ha comentado, en el caso de cualquier dispositivo que se diseñe en la “Latitud Cero” solo es necesario conocer la declinación solar para un día específico y con sumar algebraicamente dicho valor tenemos la altura de culminación para realizar nuestro diseño.

Nos queda determinar la hora en que el Sol pasa por el Meridiano del lugar y lo haremos utilizando la ecuación de rectificación horaria que es la siguiente:

[62]

$$H_s = H_{of} + 4L + Ect + H_v$$

Donde:

H_{of} es la hora oficial que, en este caso, es la que se quiere determinar para saber con exactitud a qué hora ocurrirá el efecto.

H_s es la Hora solar.

$4L$ es el tiempo de diferencia entre el meridiano del lugar y el meridiano de referencia expresado en horas con valor negativo si el emplazamiento en estudio está al oeste del meridiano de referencia.

Ect es el valor de la ecuación de tiempo para el día específico en que se realiza el estudio.

Hv es el horario de verano que en el caso de Ecuador no se aplica y por tanto adquiere el valor de cero.

Entonces, para realizar este cálculo la ecuación de rectificación horaria queda de la siguiente forma porque eliminamos el parámetro Hv :

[63]

$$H_s = H_{of} + 4L + Ect$$

Y despejando H_{of} que es lo que deseamos determinar la ecuación queda así:

[64]

$$H_{of} = H_s - 4L - Ect$$

Ahora nos percatamos que debemos de calcular el valor la ecuación de tiempo que como se sabe es:

[65]

$$Et = 9.87 \sin \frac{360(Nd - 81)}{182} - 7.53 \cos \frac{360(Nd - 81)}{364} - 1.5 \sin \frac{360(Nd - 81)}{364}$$

Y sustituyendo el valor calculado de Nd en el inciso "a" queda de la siguiente forma:

[66]

$$Et = 9.87 \sin \frac{360(340.7166 - 81)}{182} - 7.53 \cos \frac{360(340.7166 - 81)}{364} - 1.5 \sin \frac{360(340.7166 - 81)}{364}$$

El resultado de esta ecuación es: +7.6324 minutos que equivale a 0.1272 horas.

También tenemos que determinar el valor $4L$ que es el tiempo que tarda el Sol en pasar desde el meridiano de referencia hasta el meridiano del sitio en estudio mediante la ecuación siguiente:

[67]

$$4L = Ml - Mr$$

Donde:

Ml es el meridiano del lugar objeto de estudio, que en este caso es -78°

Mr es el meridiano de referencia, que en este caso es -75°

Entonces, sustituyendo los valores en la ecuación queda:

[68]

$$4L = 4[-78^\circ - (-75^\circ)]$$

[69]

$$4L = 4[-78^\circ + 75^\circ]$$

[70]

$$4L = 4 \text{ min}[-3^\circ] = -12 \text{ min} = -0.2 \text{ horas}$$

Ahora estamos en condiciones de sustituir estos valores en la ecuación de rectificación horaria.

$$12 \text{ horas} = Hof + (-0.2 \text{ horas}) + 0.1272 \text{ horas}$$

[71]

$$12 \text{ horas} = Hof - 0.2 \text{ horas} + 0.1272 \text{ horas}$$

$$12 \text{ horas} = Hof - 0.2 \text{ horas} + 0.1272 \text{ horas}$$

[72]

$$12 \text{ horas} = Hof - 0.0728 \text{ horas}$$

$$12 \text{ horas} = Hof - 0.0728 \text{ horas}$$

Hof es 12 horas mas 0.0728 horas o, mejor, 12 horas con 4 minutos y 22 segundos.

Entonces podemos afirmar que La Cruz del Tiempo que está estampada en la superficie de proyección que se encuentra en el interior del espacio se iluminará plenamente a esa hora exacta (12:04:22) pero los visitantes podrán ver desde antes de ese momento como la luz, sin una forma definida, que penetra por la perforación en la cubierta se va acercando poco a poco al lugar previsto y se plasma con toda precisión a la hora prevista en el plano de proyección con su contorno correcto.

Solución del inciso “b”**Datos:**

Latitud: 00°00'00”

Longitud: -78°00'00”

Meridiano de referencia que rige la hora en Ecuador: 75°00'00” de longitud oeste.

Fecha en que se desea lograr el efecto solar: 6 de diciembre.

Hora oficial en que se desea que ocurra el efecto solar: 9:00 horas o 9:00 am.

Solución del problema:

Para solucionar este problema expondremos las ecuaciones necesarias en un orden lógico teniendo en cuenta que en algunos casos se harán las sustituciones necesarias con la solución completa y en otros solo se mostrarán de forma directa los resultados como es el caso de la determinación de la Ecuación de Tiempo que en muchos casos ya hasta está tabulado y la fracción de día (Fd). En cada caso y si fuera necesario, se harán los comentarios correspondientes.

Como se sabe, lo primero que hay que hacer es el cálculo de la fecha utilizando la ecuación del Nd para luego introducir este dato en la ecuación de la Declinación Solar (δ)

Cálculo del Nd

[73]

correspondiente al 6 de diciembre a las 9:00 horas.

$$Nd = \sum d(\text{enero} \rightarrow \text{diciembre}) + Fd = 340.5917 \text{ dias}$$

Cálculo de la Declinación Solar

[74]

$$\delta = 23.4415833333 \sin \frac{360}{365.242199074} (284 + Nd) = -22^{\circ}42'28.38''$$

Como se puede observar, este valor de declinación solar es modularmente menor que el que calculamos para el mismo día a las 12:04:22 horas que es el instante en que el Sol pasa por el meridiano del lugar ($-22^{\circ}43'13.20''$), la diferencia es de tan solo $00^{\circ}00'44.82''$ y esto corrobora el hecho de que los incrementos, ya sean positivos o negativos de este parámetro, en intervalos menores de un día son mínimos pero como estamos realizando un diseño en extremo preciso es necesario tenerlo en cuenta. Si se tratara, por ejemplo, de la creación de un elemento de protección solar tal vez no sería necesario hacerlo pero no es nuestro caso.

Cálculo del valor de la Ecuación de Tiempo (Et):

[75]

$$Et = 9.87 \sin \frac{360(Nd - 81)}{182} - 7.53 \cos \frac{360(Nd - 81)}{364} - 1.5 \sin \frac{360(Nd - 81)}{364} = 7.6867 \text{ min}$$

[76]

$$Et = 7.6867 \text{ min} = 0.1281 \text{ horas}$$

En esta ecuación se sustituyó el Nd por 340.5917 días como se supone que se hizo en la ecuación de la Declinación Solar.

Cálculo del Ángulo Horario

Recordemos que el ángulo horario es aquel que forman los rayos solares en un instante determinado con el plano meridiano y se mide desde el meridiano hacia el oeste, por ejemplo, a las 13:00 horas el ángulo horario es 15° al oeste. Este parámetro constituye la segunda coordenada del llamado Sistema Ecuatorial u Horario, la primera ecuación de dicho sistema es la Declinación Solar. Este parámetro se determina según las ecuaciones siguientes:

$H = (hora - 12) 15^\circ$ Dentro del rango de 12:00 a 24:00 (del mediodía a la medianoche)

$H = (hora + 12) 15^\circ$ Dentro del rango de 24:00 a 12:00 (de la medianoche al mediodía)

En nuestro caso utilizaremos la segunda ecuación (de la medianoche al mediodía) porque la hora que estudiamos está dentro de ese rango.

Veamos:

[77]

$$H = (hora + 12)15^\circ$$

Sustituyendo el valor de la hora en dicha ecuación tendremos:

[78]

$$H = (9 \text{ horas} + 12)15^\circ = 315^\circ$$

Este dato lo utilizaremos más adelante para el cálculo de las coordenadas del Sistema Horizontal que son las que utilizan los arquitectos para sus diseños y que pueden ser medibles con diferentes instrumentos en las obras.

Cálculo de la Altura Solar

Recordemos que la altura solar “hs” se define como el ángulo que forman los rayos solares en un instante determinado sobre un punto dado respecto al plano horizontal y la define la expresión:

[79]

$$h = \arcsin(\sin \varphi \sin \delta + \cos \delta \cos H)$$

Donde:

φ es la latitud del lugar. En este caso 00°00'00"

δ es la declinación solar. En este caso -22°42'27.28"

H es el ángulo horario. En este caso es 315°

Sustituyendo los valores en la ecuación vemos que el primer sumando de lo que se encuentra dentro del paréntesis se anula porque teniendo la latitud un valor “cero” por encontrarnos en el Ecuador el seno de dicha declinación se hace también cero y todo lo que se multiplica por cero se anula; además en el segundo sumando aparece la expresión $\cos \varphi$, pero como $\varphi = 00^{\circ}00'00''$ el coseno toma el valor 1 (uno) de manera que para el caso de la latitud 00°00'00" la ecuación de la Altura Solar

se simplifica de la siguiente forma:

[80]

$$h = \arcsin(\cos \delta \cos H)$$

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación tendremos:

[81]

$$h = \arcsin(\cos -22^{\circ}42'28.38'' \cos 315^{\circ})$$

[82]

$$h = \arcsin(0.652295387) = 40^{\circ}42'53.6''$$

De manera que este es el ángulo de altura solar que debe caer perpendicularmente sobre la superficie o “cubierta” perforada con la forma de La Cruz del Tiempo pero no basta con saber esa inclinación (vertical) respecto al plano horizontal pues se hace necesario también saber qué ángulo horizontal se debe orientar en dicha superficie con relación al Norte Geográfico y es el Acimut solar el ángulo que hay que calcular para ubicar definitivamente el dispositivo solar.

Cálculo del Acimut Solar

Tengamos en cuenta que el Acimut Solar se define como el ángulo medido sobre el plano del horizonte que forma la proyección horizontal de los rayos del Sol con la línea meridiana (dirección norte sur), el acimut se puede medir desde el sur o desde el norte. En nuestro caso lo mediremos desde el norte, por lo que la ecuación que se presenta a continuación es la única que se utilizará en los cálculos.

[83]

$$A = \arcsin \frac{\sin \delta - (\sin \varphi)(\sin h)}{(\cos \varphi)(\cos h)}$$

Donde:

A es el acimut.

δ es la declinación solar. En este caso $-22^{\circ}42'27.28''$

φ es la latitud. En este caso $00^{\circ}00'00''$

hs es la altura solar. En este caso es $40^{\circ}42'53.6''$

Como se puede ver en la ecuación del Acimut Solar el segundo término del numerador de la ecuación se cancela porque el seno de la latitud se hace cero y al multiplicar por cero el seno de la Altura Solar se anula, así mismo como el coseno de dicha latitud es 1 (uno) el primer factor del denominador que es coseno de la latitud queda multiplicando al coseno de la Altura Solar quedando solamente este término en el denominador. Entonces la ecuación quede como sigue:

[84]

$$A = \arcsin \frac{\sin \delta}{\cos h}$$

Sustituyendo así los demás valores tendremos:

[85]

$$A = \arcsin \frac{\sin -22^{\circ}42'27.28''}{\cos 40^{\circ}42'53.6''} = \frac{-0.386028051}{0.757964856} = -0.509295448$$

[86]

$$A = \arcsin -0.509296053$$

Entonces el valor de A = $120^{\circ}37'0.88''$

De manera que ese será el ángulo medido desde el Norte Geográfico en que debe de orientarse horizontalmente la edificación así como la superficie perforada con la forma de La Cruz del Tiempo.

¿Sabías que?

Los habitantes de la pequeña ciudad noruega de Rjukan, han instalado tres espejos gigantes -helióstatos- para poder recibir el sol en la plaza del mercado, debido a su ubicación ($59^{\circ}52'52''N8^{\circ}34'59''E$) cercana al Círculo Polar Ártico, esta ciudad permanece en la sombra aproximadamente seis meses al año (Franco, 2013).

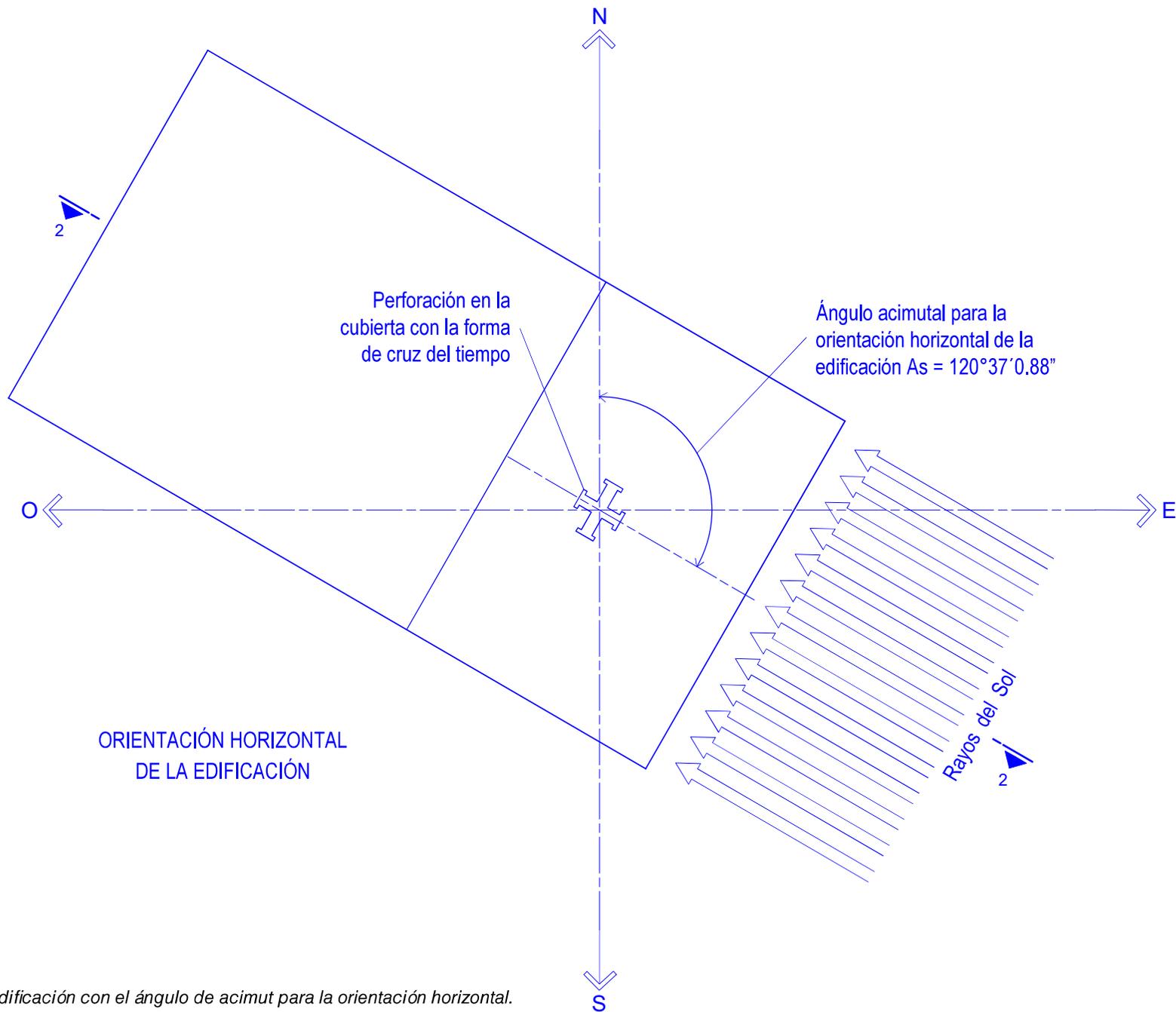


Figura 51. Vista superior de la edificación con el ángulo de acimut para la orientación horizontal.

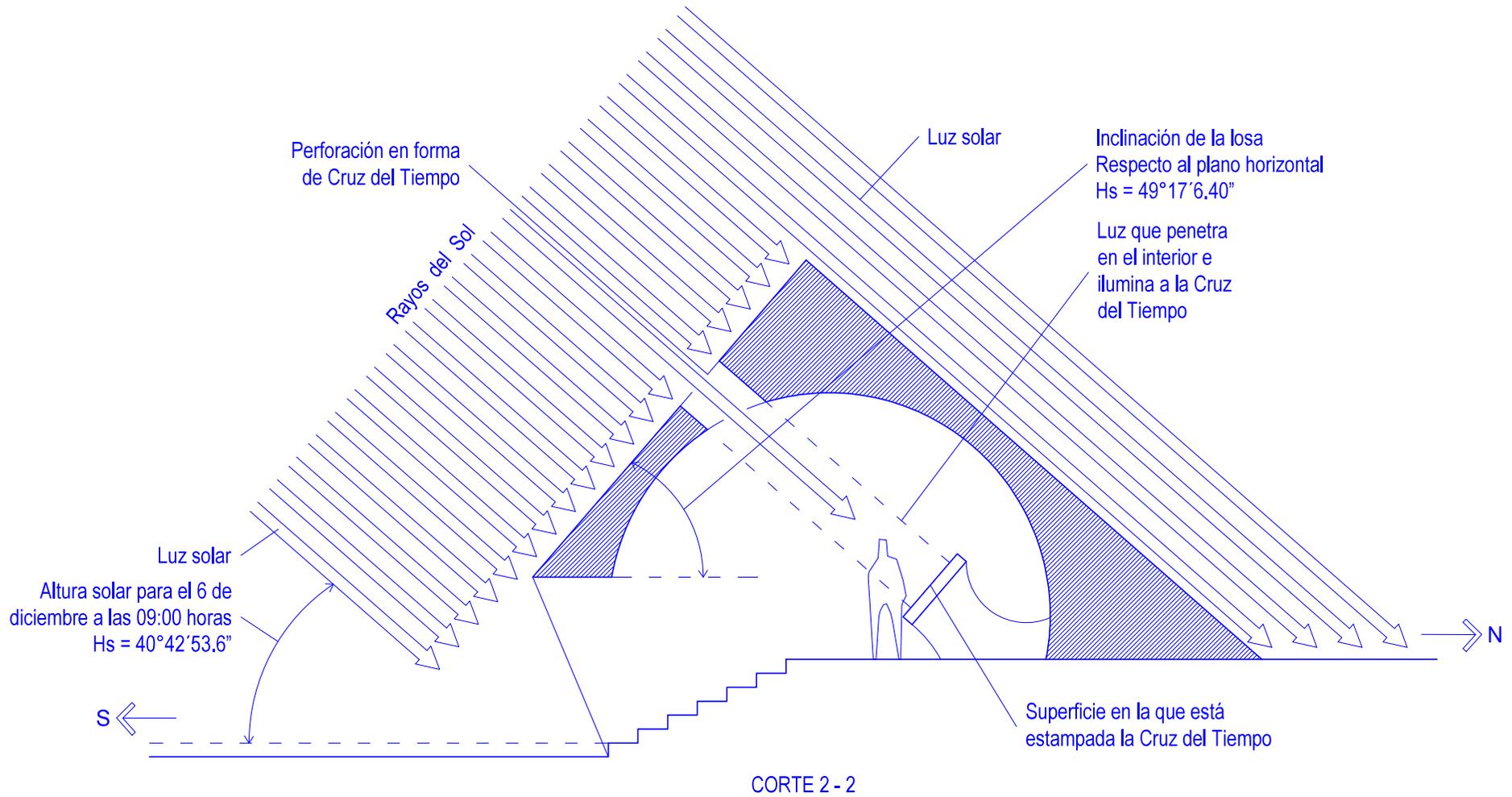


Figura 52. Corte 2-2 en el que se aprecia la altura solar para el 6 de diciembre a las 9:00 horas.

PARTE 4.
GRÁFICOS
SOLARES



**PARTE 4.
GRÁFICOS SOLARES**

Capilla San Bernardo, Córdoba, Argentina.

PARTE 4. GRÁFICOS SOLARES

Luego de comprender la metodología de cálculo o analítica, es necesario adquirir otras habilidades para comprender completamente la temática. El conocimiento de la posición Sol, tanto para un momento en específico, como para todo el año, es de vital importancia, por ello se brinda a continuación un compendio de maneras para representar el recorrido solar y de las sombras, haciendo énfasis en las latitudes notables, ya que éstas describen de forma singular el recorrido del Sol y nos ayudan a entenderlo de modo sencillo.

Tipos de diagramas y gráficos solares

Existen diferentes tipos de diagramas para representar las trayectorias solares por medio de las coordenadas solares de acimut y altura solar muy aplicables en la arquitectura y el urbanismo; todos con el fin de poder evaluar y diseñar mediante el uso de métodos gráficos (Bartolini & Pierozzi, 2016). Entre ellos están:

- Proyección esférica u ortogonal.
- Proyección cilíndrica.
- Proyección equidistante o polar.
- Proyección estereográfica.
- Proyección de ejes cartesianos.
- Sombrigramas solares o cartas solares-sombra.

Para poder interpretar correctamente cada una de las proyecciones o diagramas solares es necesario dominar una serie de aspectos importantes:

1. Las proyecciones o gráficos solares son representaciones en vista superior de la bóveda celeste para una latitud dada, mediante la interpolación de valores de coordenadas de acimut y altura solar.

2. El acimut se mide en ángulos a partir del norte en el sentido horario, partiendo desde el norte 0° creciendo hasta completar 360° , en este caso al este (E) le corresponde 90° , al sur (S) 180° y al oeste (W) le corresponde 270° .

3. La altura solar se mide también en ángulos y se representa mediante circunferencias que constituyen los ángulos más significativos, en la que la circunferencia más grande es el 0° y está contenida en el plano del horizonte del lugar, hasta llegar a los 90° que corresponde con el cenit de la latitud, creciendo en valores de 10° cada circunferencia.

4. A partir de estos diagramas se puede replantear cualquier ubicación aparente del Sol siempre y cuando se conozcan los valores de acimut y altura solar.

5. A su vez se pueden interpretar una serie de conceptos que se desprenden de los recorridos solares para cada latitud:

- En la latitud 0° -Ecuador Terrestre- el Sol posee siempre un recorrido anual simétrico con respecto al eje E – W y los valores de altura solar son los más altos en horarios del mediodía, permitiendo al sol pasar por el cenit

(90° de altura solar) dos veces al año, los días de los equinoccios.

- En los trópicos los valores de altura solar medidos al mediodía también son elevados y el Sol pasa por el cenit los días del Solsticio de Verano para el Trópico de Cáncer (+23,44°) y para el Trópico de Capricornio (-23,44°) el día de Solsticio de Invierno.

- Los valores de altura solar para horas del mediodía disminuyen progresivamente para las latitudes que van desde el Trópico de Cáncer (+23,44°) hasta el Polo Norte (+90°), y del Trópico de Capricornio (-23,44°) hasta el Polo Sur (-90°), siendo considerablemente menores en la medida que nos acercamos a los polos. En estas latitudes nunca el Sol pasa por el cenit, o lo que es lo mismo, el Sol nunca está perpendicular al plano del horizonte de la latitud en estudio.

- En los círculos polares Ártico (+66,56°) y Antártico (-66,56°) el Sol posee valores de altura solar en horas del mediodía que van desde aproximadamente 46,88° en el verano para cada latitud, hasta los 0° - ubicado en el plano del horizonte- en el invierno correspondiente a cada hemisferio.

- En los polos las alturas solares tienen un comportamiento singular, con valores de altura solar máximos de 23,44°, con días de 24 horas de sol, y días de 24 horas sin sol para cuando este alcanza valores de altura solar de -23,44°, o sea, está por debajo del plano del horizonte para esta latitud.

A continuación, se describen cada uno de los tipos de diagramas con el fin de entender y facilitar su aplicación.

¿Sabías que?

El Sol a medida que irradia energía transforma 700 millones de toneladas de hidrógeno en cenizas de helio por segundo, pero su masa total no disminuirá apreciablemente en el curso de los próximos 6 000 millones de años (Wikipedia, 2022b).

Proyección esférica u ortogonal

La proyección esférica es la representación de la bóveda celeste y las trayectorias solares, de manera que se facilita, para efectos prácticos, la ubicación del Sol para cualquier hora y día del año (Figura. 53) (Lacomba et al., 1991; Marsh, 2021a) (Lacomba et al., 1991; Marsh, 2021b).

Es pertinente recalcar que, la proyección ortogonal resalta entre todos los tipos de proyección; la más realista, y se destaca por estar en un lenguaje gráfico mayormente conocido por los arquitectos, ya que emplea vistas en planta, alzados y cortes, por lo que facilita el replanteo de forma directa de las trayectorias y posiciones solares en los diversos elementos arquitectónicos.

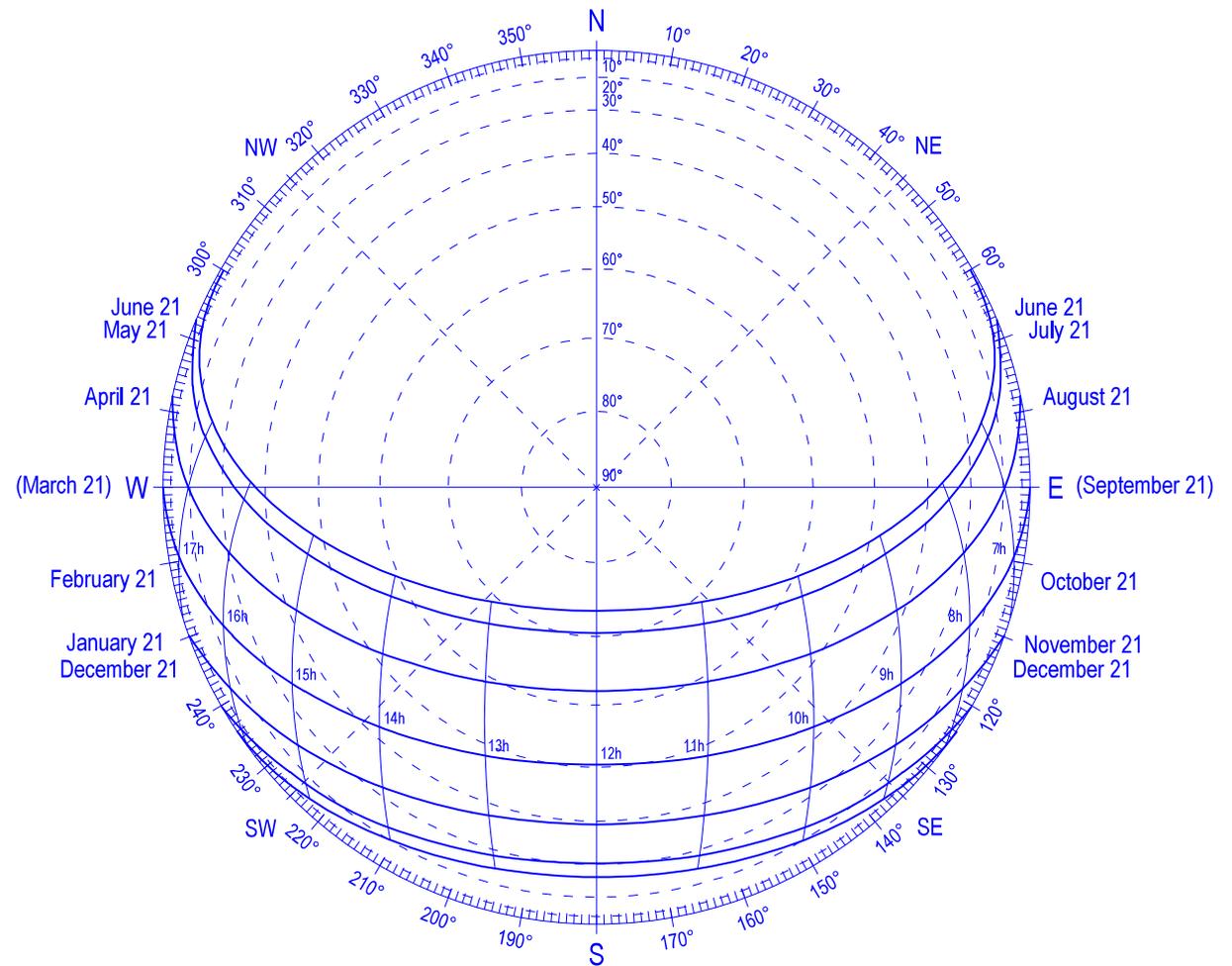


Figura 53. Proyección ortogonal o esférica para la Latitud +40°.

Proyección cilíndrica

La proyección cilíndrica es una representación simplificada de la proyección ortogonal realizada por el arquitecto Miguel Beltrán en 1937. Consiste en transformar la bóveda celeste en un cilindro tangente a ésta, de forma tal que el replanteo de las horas en las proyecciones verticales y horizontales se conciben como líneas rectas paralelas. La proyección cilíndrica, aunque menos realista que la proyección ortogonal, también posibilita el diseño y la evaluación de dispositivos de control solar (Lacomba et al., 1991; Marsh, 2021a).

Proyección equidistante o polar

En esta proyección se representan en un solo plano las dos coordenadas celestes y solares (Lacomba et al., 1991; Marsh, 2021a). La principal característica de este tipo de proyección es la equidistancia de las circunferencias concéntricas que representan las alturas. Este método se combina con una mascarilla de sombreado para poder diseñar o evaluar sistemas de control solar.

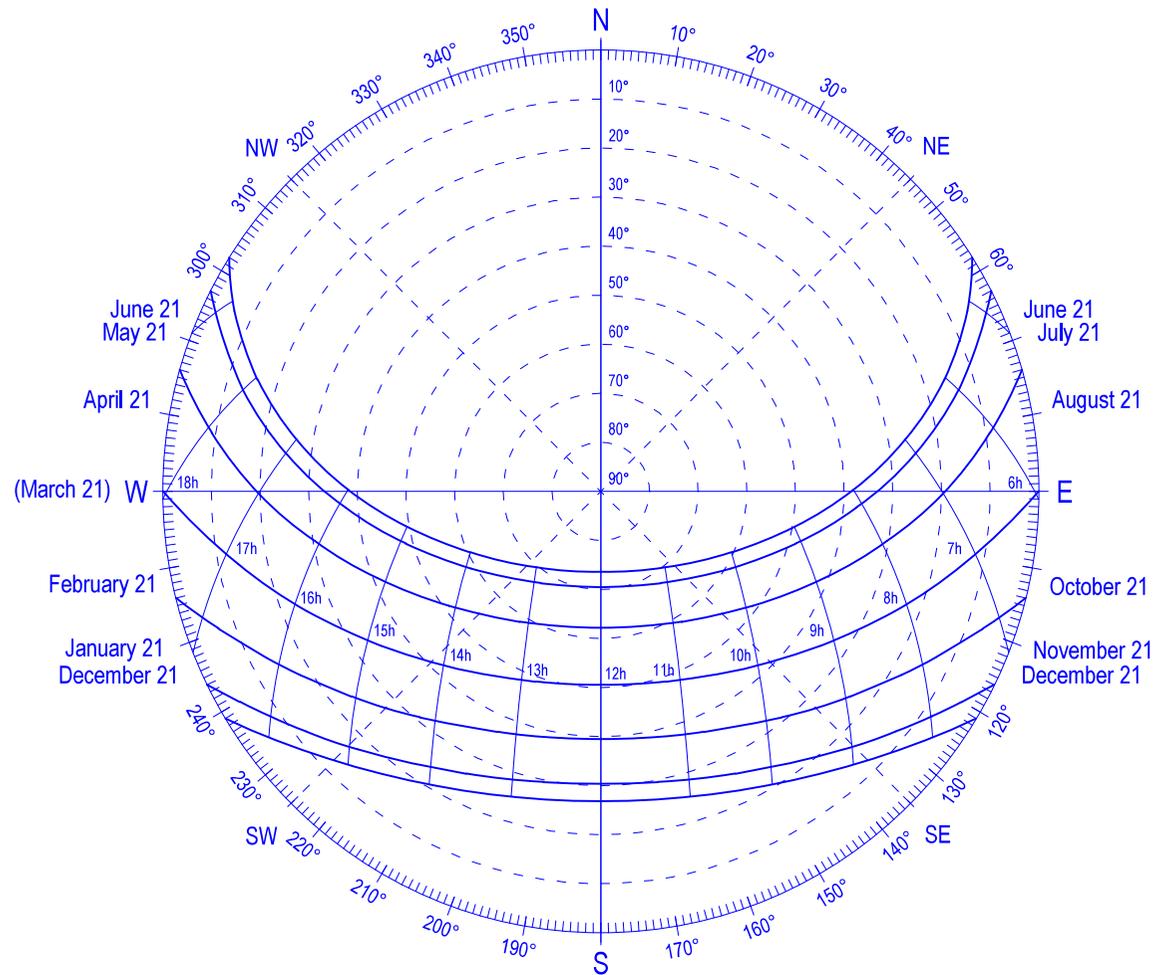


Figura 54. Proyección equidistante para la Latitud +40°.

Proyección estereográfica

Este método, al igual que los anteriores, también representan las coordenadas solares en un único esquema, la ventaja que proporciona este método es la de dotar de mejores condiciones para trabajar en el borde del gráfico, brindando así una fácil comprensión y mayor versatilidad en su uso; ideal para el estudio de sombras proyectadas, así como para el análisis, diseño y evaluación de dispositivos de control solar (Lacomba et al., 1991; Marsh, 2021a).

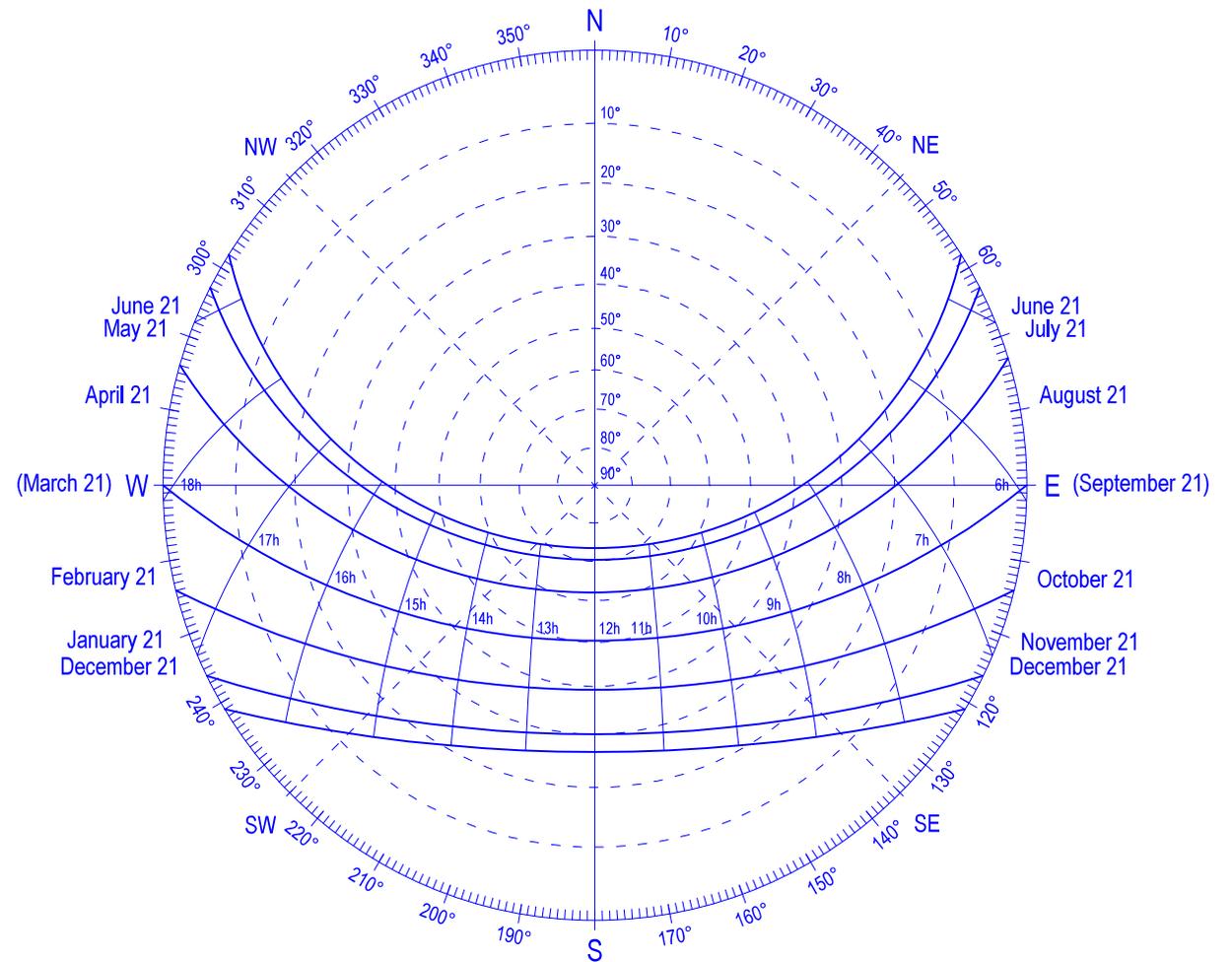


Figura 55. Proyección Estereográfica para la Latitud $+40^\circ$.

Proyección de ejes cartesianos

Esta proyección es la que se separa considerablemente de los otros métodos (Figura.56), debido a que en este procedimiento las coordenadas se replantean utilizando un sistema de ejes cartesianos. Este método es eficaz para estudiar las posibles obstrucciones de los rayos solares por elementos naturales o artificiales a edificaciones o espacios exteriores (Lacomba et al., 1991; Marsh, 2021a).

Sombrigramas solares o carta solares-sombras

Los sombrigramas (Figura 57) son el resultado de replantear las coordenadas compuestas por la longitud de las sombras y el acimut del Sol incrementado en 180°. Para ello se supone un punto suspendido a una altura X y se calculan las proyecciones de las sombras de dicho punto durante un año para las fechas más representativas. Este método se utiliza, preferentemente, para conocer el recorrido diario de las sombras, o también, para determinar los ángulos de azimut y hora solar para un instante en específico (Verdecia Cutiño, 2012).

¿Sabías que?

Cada 21 de junio día del solsticio de verano, el sol penetra por el óculo del majestuoso Panteón Romano e inunda de luz la puerta principal. Se presume que este efecto estaba diseñado para enaltecer la figura del emperador al entrar en dicho recinto en fechas conmemorativas, creando una conexión del mandatario con los dioses (Batlle Cardona, 2022).

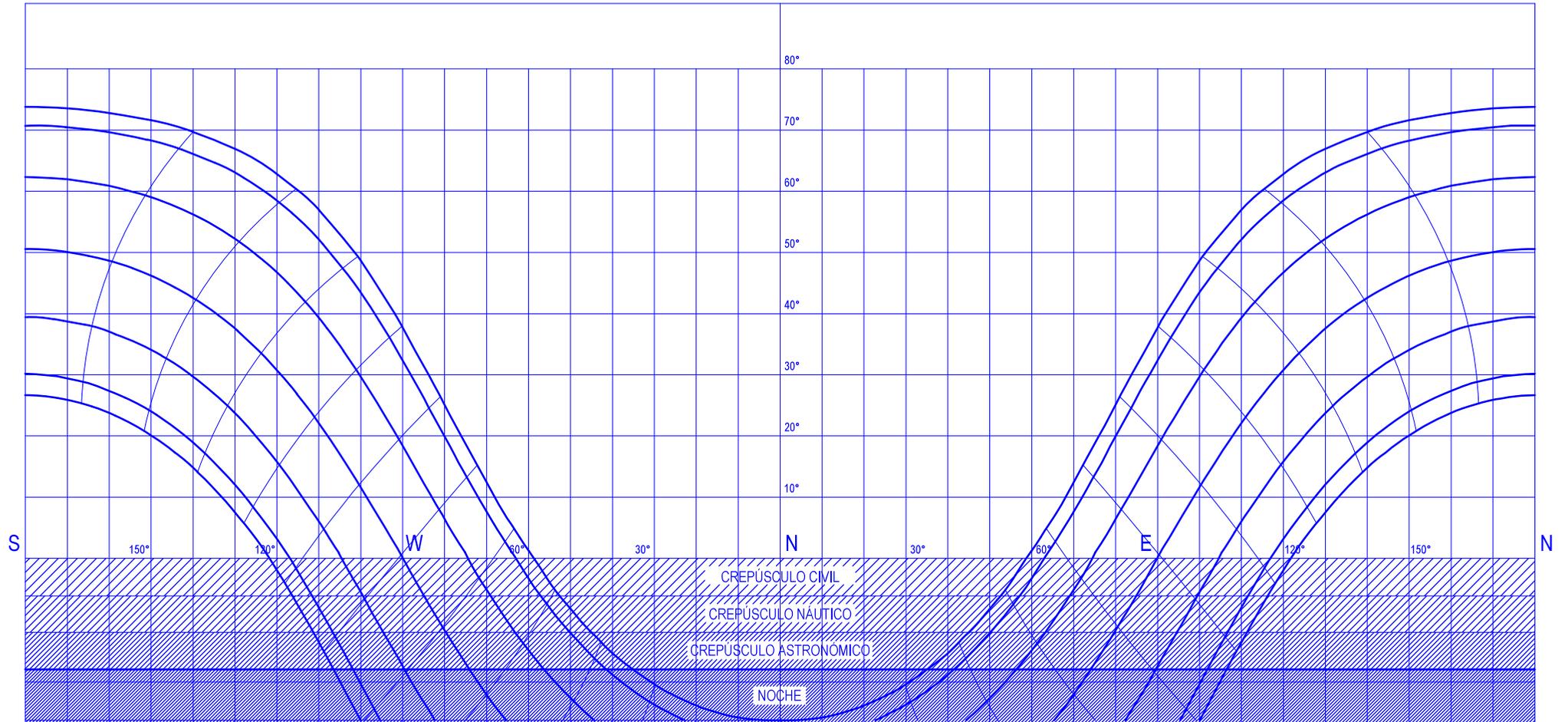
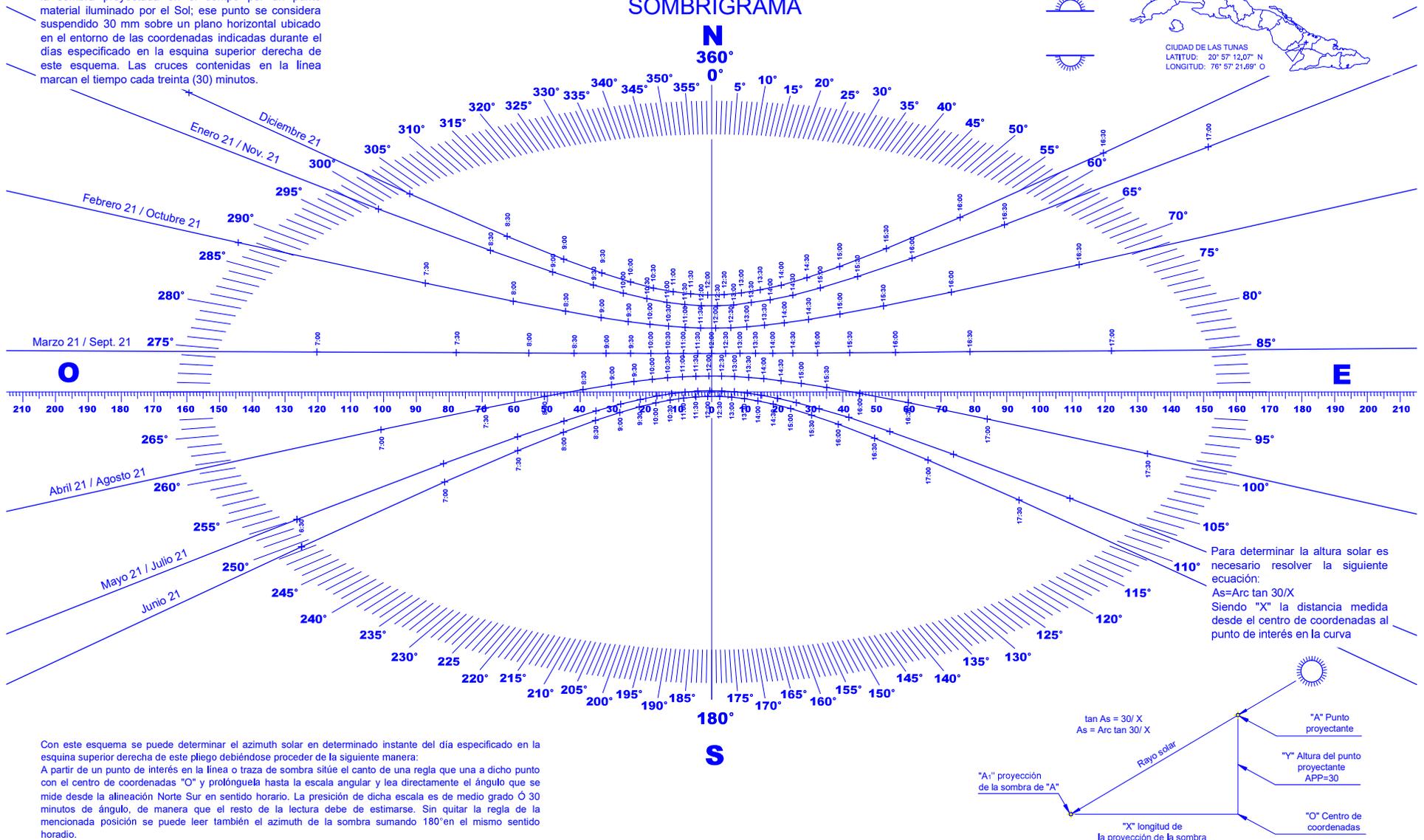


Figura 56. Proyección de ejes cartesianos para la Latitud +40°.

GRÁFICO DEL MOVIMIENTO DE LA SOMBRAS
EN LA CIUDAD DE LAS TUNAS Y SUS ALREDEDORES.

SOMBRIGRAMA

La línea impresa en este gráfico muestra el recorrido de la sombra proyectada en el tiempo por un punto material iluminado por el Sol; ese punto se considera suspendido 30 mm sobre un plano horizontal ubicado en el entorno de las coordenadas indicadas durante el día especificado en la esquina superior derecha de este esquema. Las cruces contenidas en la línea marcan el tiempo cada treinta (30) minutos.



Para determinar la altura solar es necesario resolver la siguiente ecuación:
 $As = \text{Arc tan } 30/X$
 Siendo "X" la distancia medida desde el centro de coordenadas al punto de interés en la curva

Con este esquema se puede determinar el azimuth solar en determinado instante del día especificado en la esquina superior derecha de este pliego debiéndose proceder de la siguiente manera:
 A partir de un punto de interés en la línea o traza de sombra sitúe el canto de una regla que una a dicho punto con el centro de coordenadas "O" y prolonguella hasta la escala angular y lea directamente el ángulo que se mide desde la alineación Norte Sur en sentido horario. La precisión de dicha escala es de medio grado Ó 30 minutos de ángulo, de manera que el resto de la lectura debe de estimarse. Sin quitar la regla de la mencionada posición se puede leer también el azimuth de la sombra sumando 180° en el mismo sentido horario.

Figura 57. Diagrama de las sombras para la ciudad de Las Tunas en Cuba, con Latitud de 20°57'12.07" Norte.

Diagramas solares para las latitudes notables

En resumen, los diagramas solares son la base de los métodos gráficos de análisis del posicionamiento solar, son ideales para realizar estudios sencillos y con la exactitud lógica para el uso en el análisis, diseño y evaluación de elementos de protección solar en la arquitectura y el urbanismo.

Según lo planteado en las partes anteriores, la inclinación del eje de rotación de la Tierra con respecto al plano de la eclíptica condiciona la incidencia de los rayos del Sol y con ello la aparición de las estaciones. Las latitudes notables -ángulos notables- que surgen de estas condicionantes son (Figura.58):

Latitud 0° o Ecuador terrestre.

Latitud $+23,44^{\circ}$ que corresponde con el Trópico de Cáncer (hemisferio norte).

Latitud $+66,56^{\circ}$ que coincide con el Círculo Polar Ártico (hemisferio norte).

Polo Norte que es la latitud $+90^{\circ}$ (hemisferio norte).

Latitudes $-23,44^{\circ}$ Trópico de Capricornio (hemisferio sur).

Latitud $-66,56^{\circ}$ que es el Círculo Polar Antártico (hemisferio sur).

Polo Sur a los -90° (hemisferio sur).

A continuación, se brindan la representación del recorrido solar anual para cada latitud notable representada en la proyección equidistante, a fin de entender el comportamiento del asoleamiento en las zonas más representativas de nuestro planeta (figuras 59, 60, 61, 62, 63, 64 y 65):

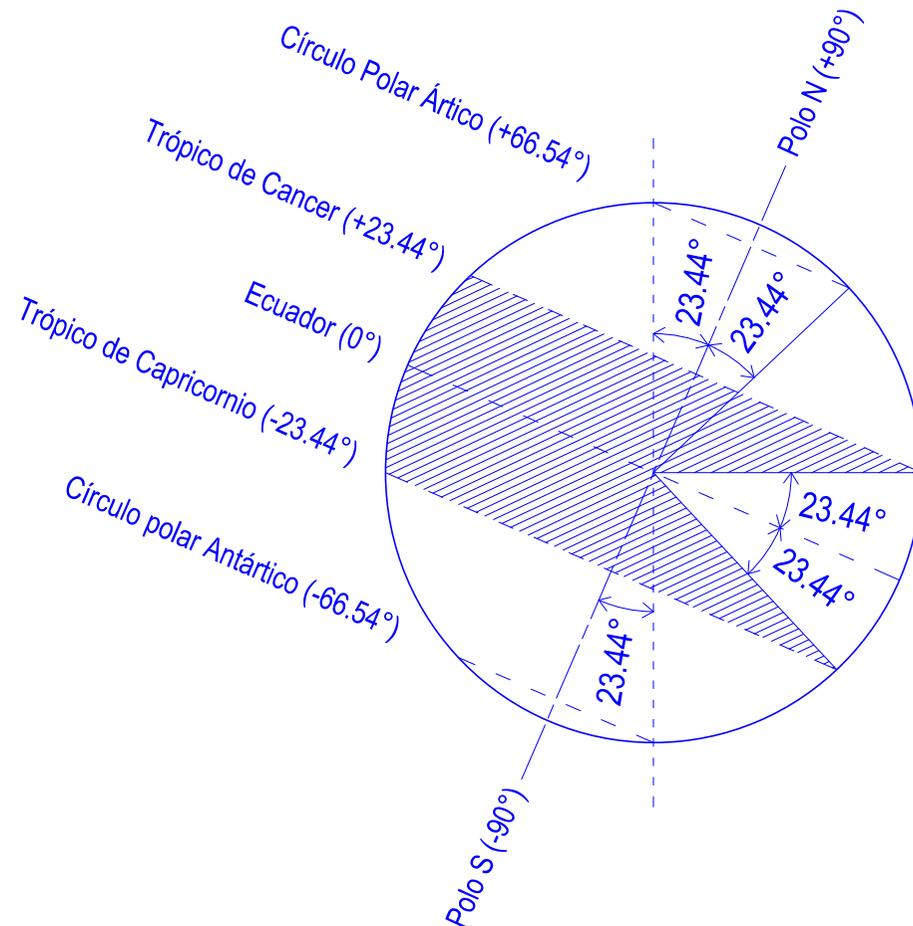
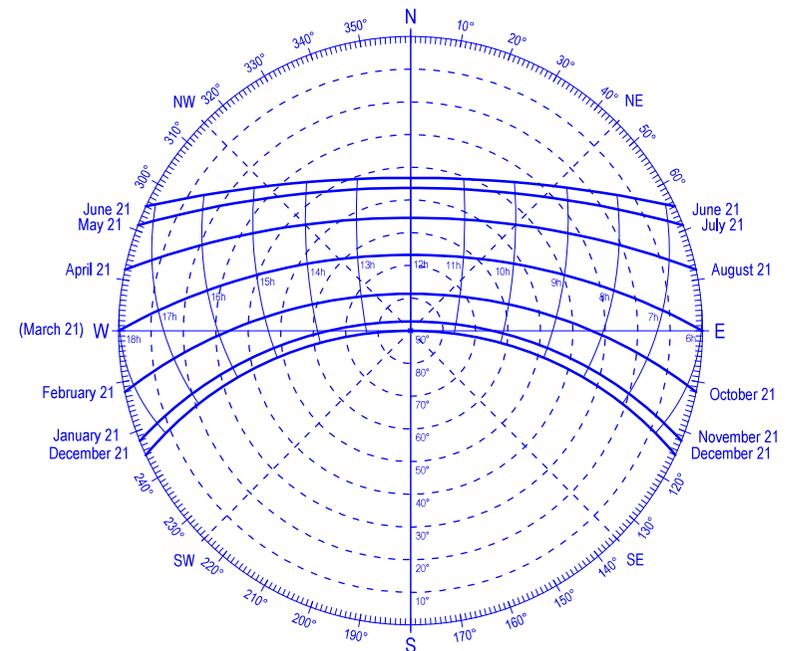
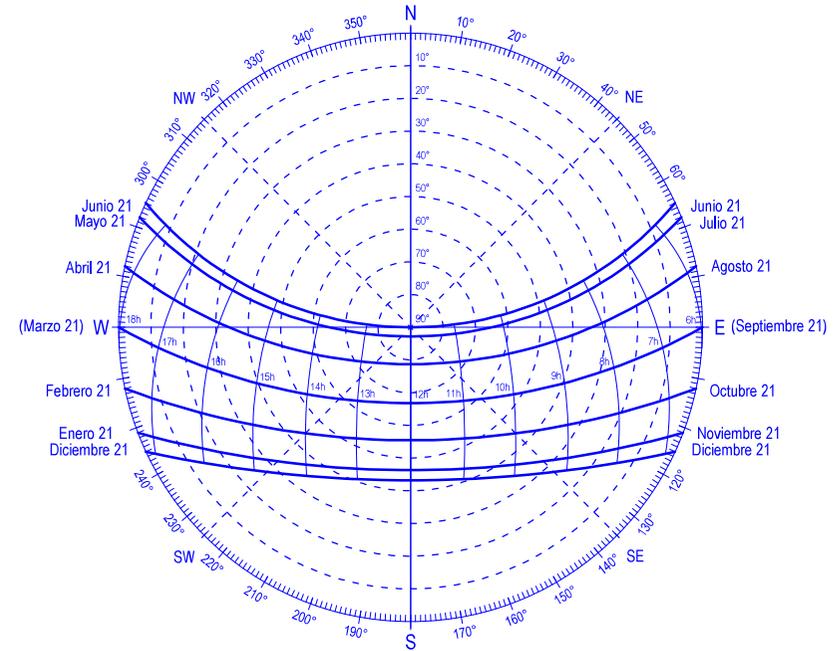
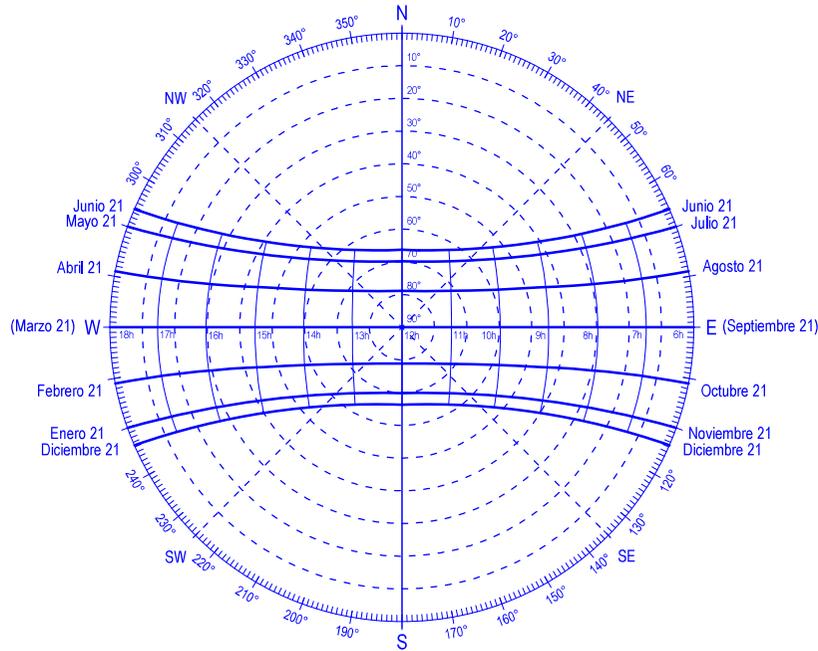


Figura 58. Ángulos o latitudes notables.



Diagramas solares de las latitudes notables representado por la proyección equidistante o polar

Figura 59. Ecuador (0°) (arriba a la izquierda).

Figura 60. Trópico de Cáncer (+23,44°) (arriba a la derecha).

Figura 61. Trópico de Capricornio (+23,44°) (abajo a la derecha).

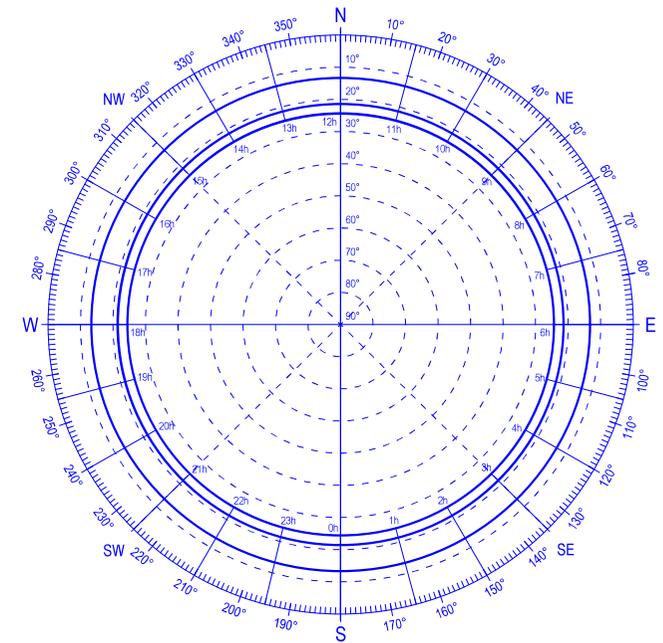
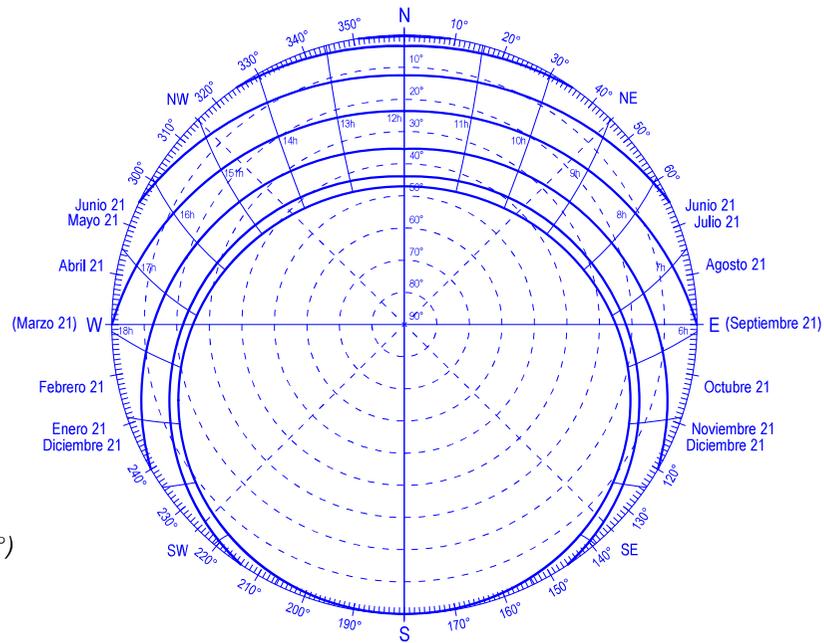
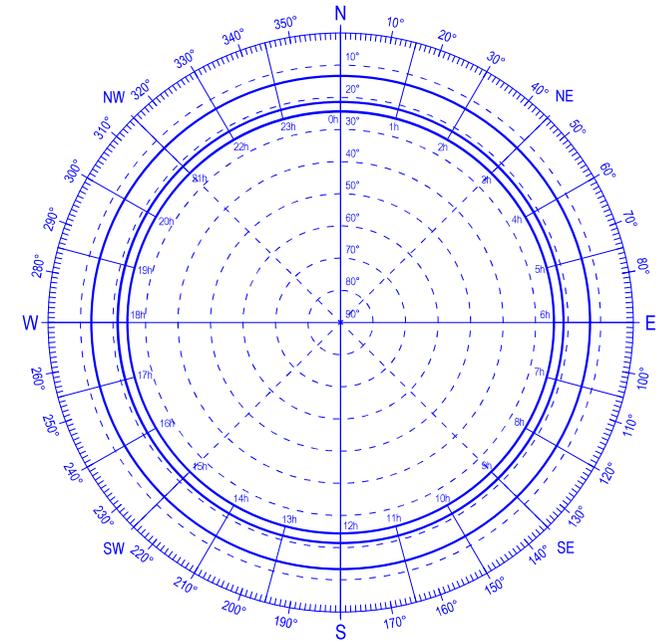
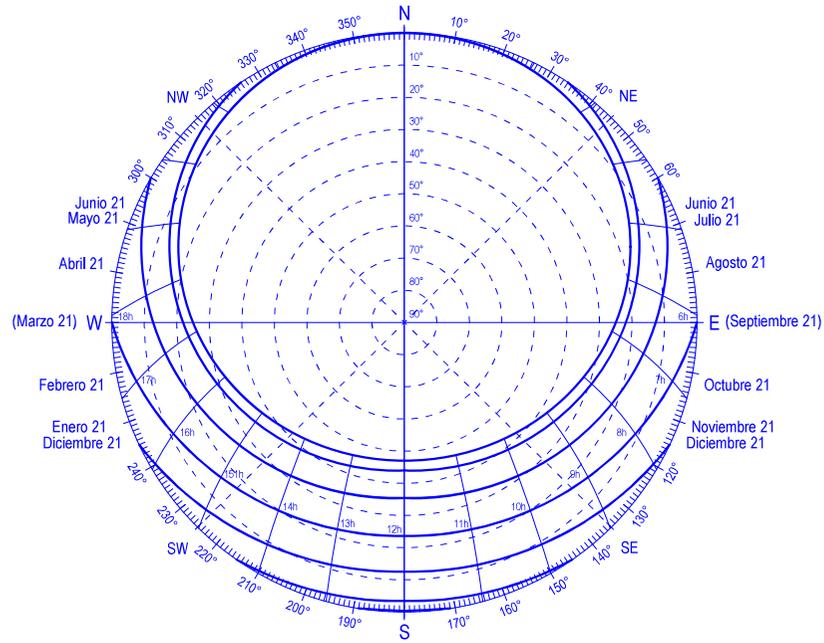


Figura 62. Círculo Polar Ártico (+66,56°)
(arriba a la izquierda).
Figura 63. Polo Norte (+90°)
(arriba a la derecha).
Figura 64. Círculo Polar Antártico (-66,56°)
(abajo a la izquierda).
Figura 65. Polo Sur (-90°)
(abajo a la derecha).

Al interpretar las series de tablas y gráficos solares; así como los gráficos de recorrido de las sombras o sombrigramas, podemos llegar a una serie de conclusiones (Lacomba et al., 1991):

Que el recorrido o trayectoria solar, así como las sombras, depende de la época del año y de la latitud en que se hace la observación, como se interpreta en las figuras anteriores. Para el Ecuador (0°) (figura 59), las trayectorias solares son simétricas y van desde el solsticio de verano aproximadamente el 21 de junio, recorrido que se desplaza hacia el norte $23,44^\circ$, hasta el solsticio de invierno con fecha cercana al 21 de diciembre con trayectorias hacia el sur también de $23,44^\circ$, pasando por el centro en los equinoccios, trayectoria que ocurre en los días cercanos al 21 de los meses de marzo y septiembre, en estos recorridos solares se divide a la bóveda celeste en dos partes iguales y pasa por el cenit (ángulo de 90° de la bóveda celeste local). En los Trópicos de Cáncer ($+23,44^\circ$) y de Capricornio ($-23,44^\circ$) (figura 60 y 61) se observa como el recorrido solar se desplaza hacia el norte o el sur respectivamente, permitiendo que el Sol pase por el cenit (90°) los días de los solsticios de verano, para el Trópico de Cáncer, y de invierno, para el Trópico de Capricornio; para el resto del tiempo el sol se inclina hasta alcanzar el ángulo más oblicuo -aproximadamente a $43,12^\circ$ - para los días del otro solsticio opuesto al del paso por el cenit. En los círculos polares (figura 62 y 64) las trayectorias son muy

inclinadas, para el Círculo Polar Ártico ($+66,56^\circ$) las trayectorias solares van desde una altura solar de $46,88^\circ$ en el solsticio de verano – aproximadamente el 21 de junio- hasta los 0° en el solsticio de invierno –cercano al 21 de diciembre-, mientras que para el Círculo Polar Antártico ($-66,56^\circ$) pasa exactamente lo contrario. En los polos (figuras 63 y 65) el Sol tiene el recorrido más singular, con seis meses de sol y seis meses de sombra y una trayectoria con altura solar máxima de $23,44^\circ$ para el solsticio de verano -21 de junio- para el Polo Norte, e igual ángulo, pero en el solsticio de invierno -21 de diciembre- para el Polo Sur.

Que la incidencia solar en un instante determinado para un punto del globo terrestre es opuesta a otro punto de similar latitud, pero con signo contrario; es decir, por ejemplo, cuando en el hemisferio Norte predomina el sol en la fachada sur, ocurre lo contrario en el hemisferio Austral: son las fachadas al norte las que reciben los rayos solares con más intensidad.

Que solo en la franja limitada por los trópicos ocurre al menos dos veces al año, para un punto determinado, el paso del Sol por el Cenit; no ocurriendo este fenómeno en el resto del globo. Ver figura 54 y 55.

Que la duración de los días y noches es la misma en el Ecuador (12 horas de sol y 12 horas de sombra) y varía con la latitud hasta llegar a los polos donde se producen 6 meses

de sol y 6 meses sin él. Ver de la figura 59 a la 65.

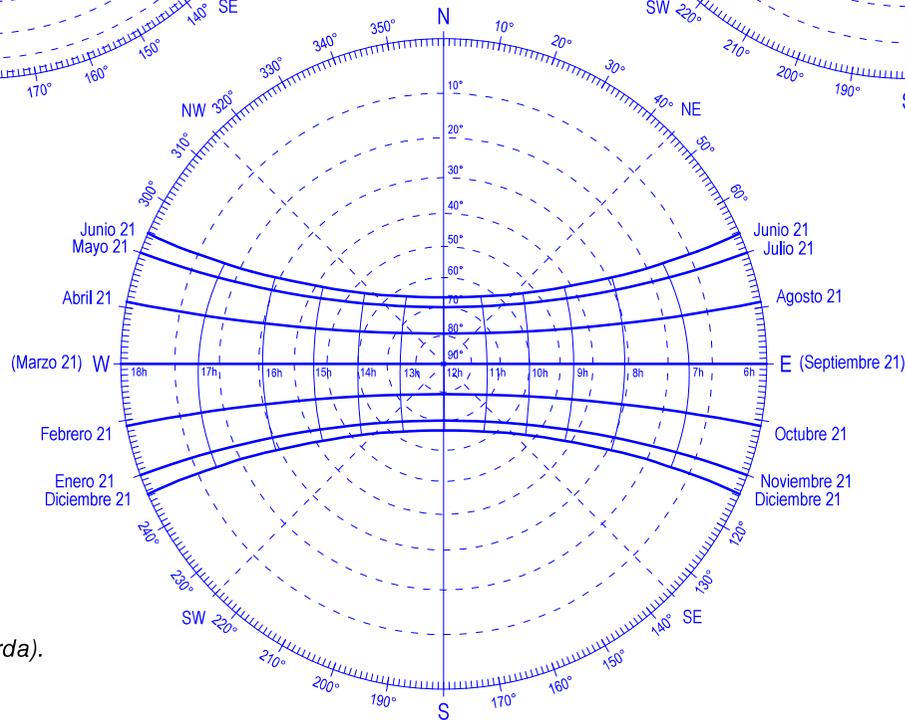
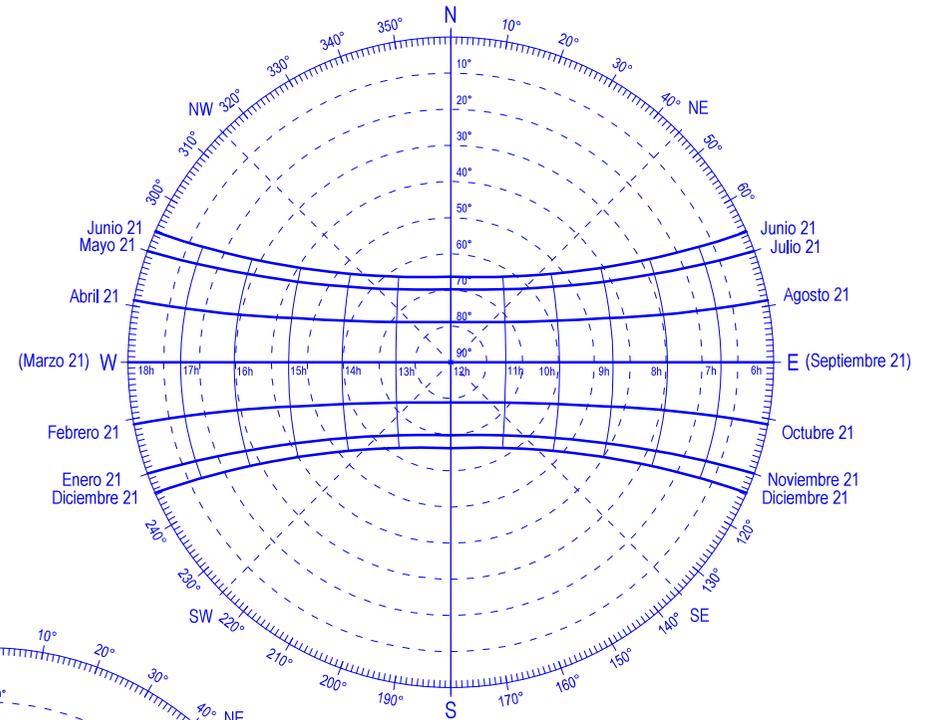
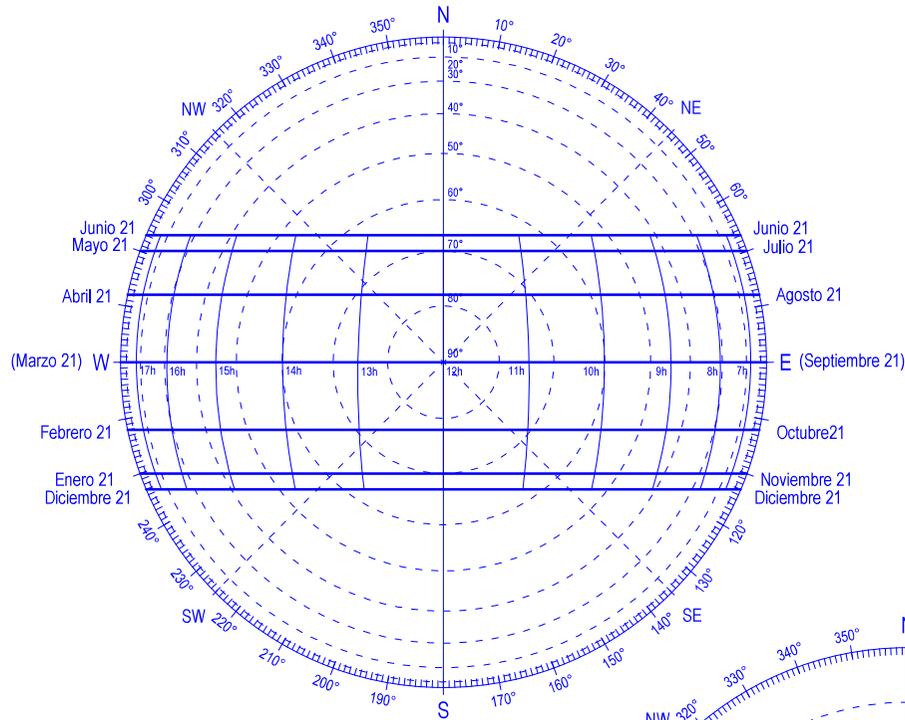
Es bueno señalar que, pueden ser desconcertantes los cambios bruscos en acimut que se producen en las horas cercanas al paso del Sol por el meridiano, por ejemplo, en el Ecuador a las 11:50 horas del día 21 de junio el acimut es algo más de 6° , sin embargo, a las 12:10 horas sobrepasan los 355° ; esto se debe a que el Sol cambia del primer cuadrante al cuarto cuadrante cuando pasa por el meridiano.

Otras incongruencias aparentes en los parámetros solares se deben a que la posición del Sol o de la sombra se calcula por coordenadas polares, siendo estas difíciles de interpretar de una ojeada, se necesita entonces graficar estos resultados para visualizarlos y comprenderlos mejor.

Como se observa en los gráficos y tablas, hay latitudes en las que ha sido necesario calcular las coordenadas para una mayor cantidad de horas, ya que nuestra principal estrella se mantiene mucho tiempo por encima del horizonte.

¿Sabías que?

El hemisferio norte (Boreal) se encuentra en pleno verano cuando la Tierra en su órbita está pasando por el afelio, punto en el que la tierra está más alejada del Sol. Generalmente ocurre en fechas cercanas al 4 de julio (Howell, 2021).



Ecuador terrestre (0°)

Figura 66. Proyección ortogonal o esférica (arriba a la izquierda).

Figura 67. Proyección equidistante (arriba a la derecha).

Figura 68. Proyección Estereográfica (abajo al centro).

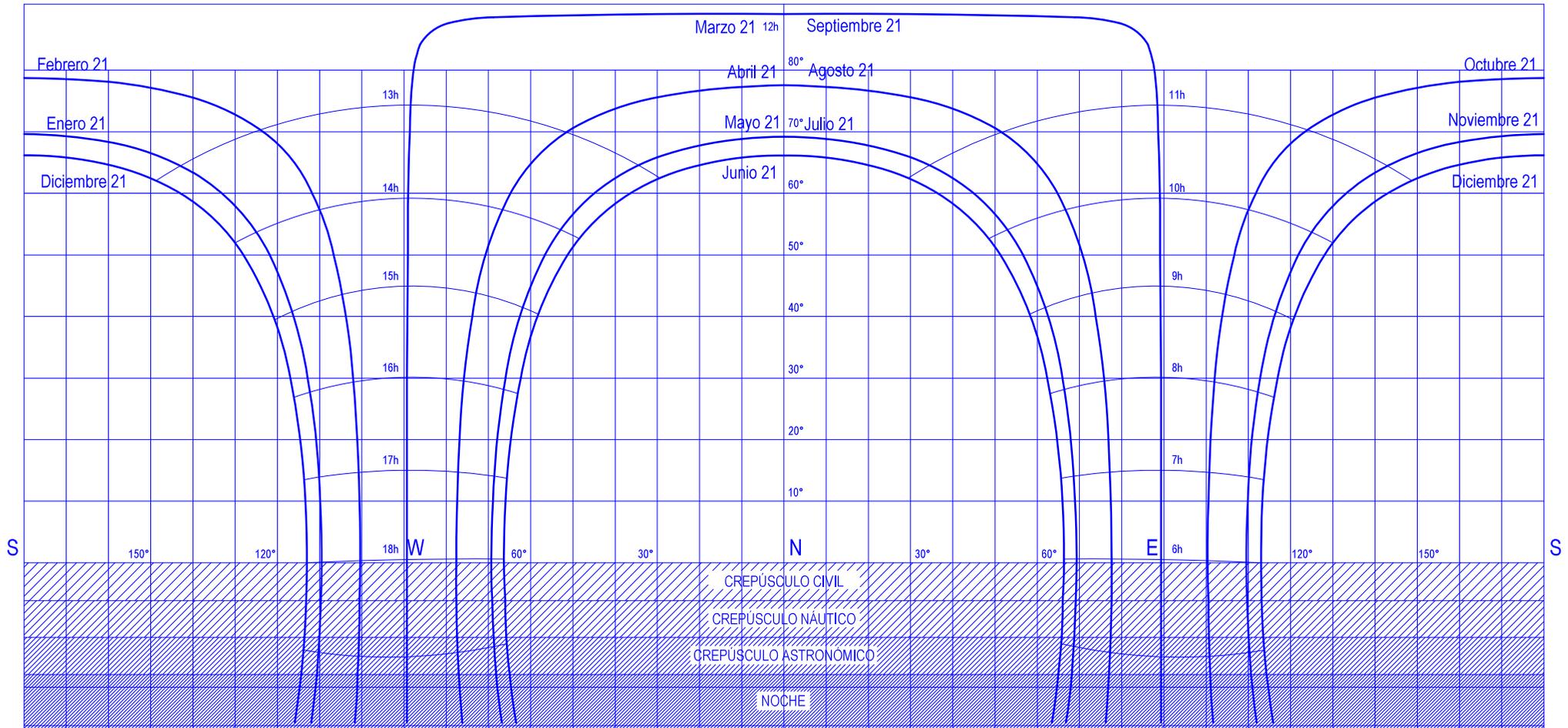
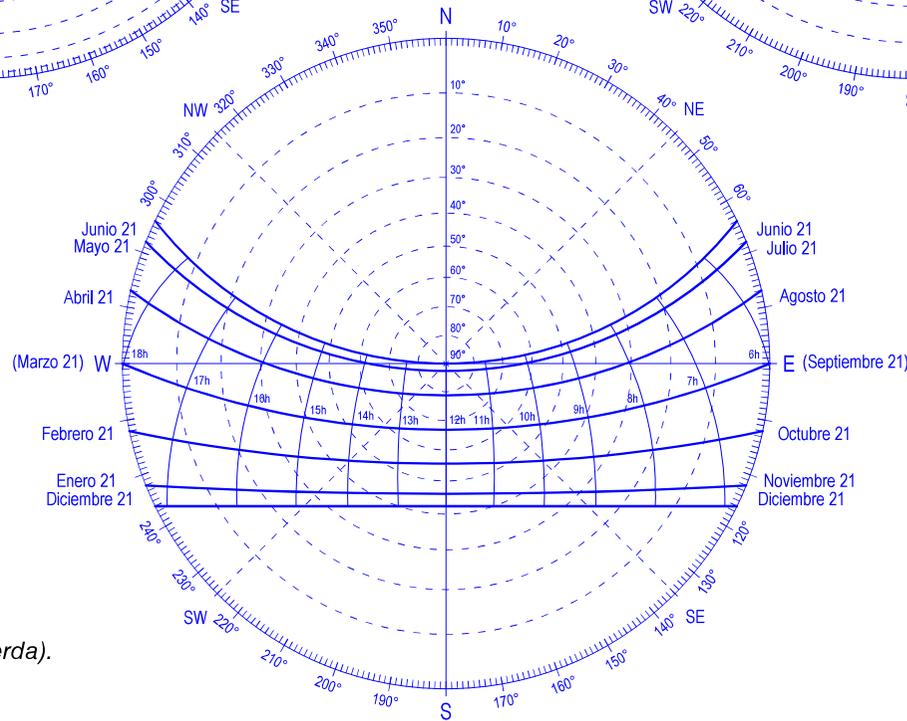
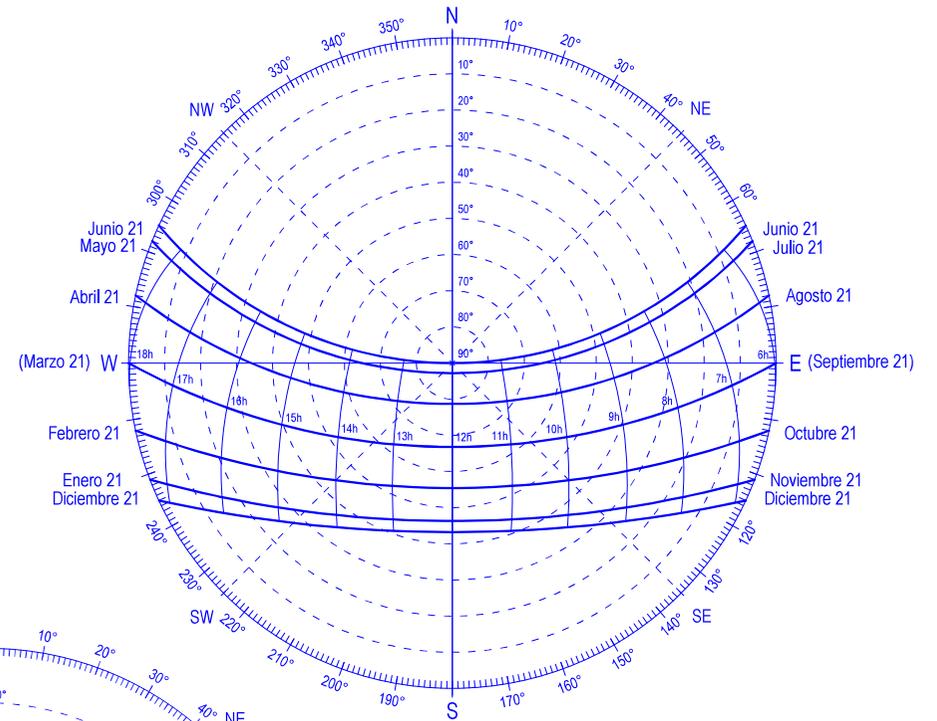
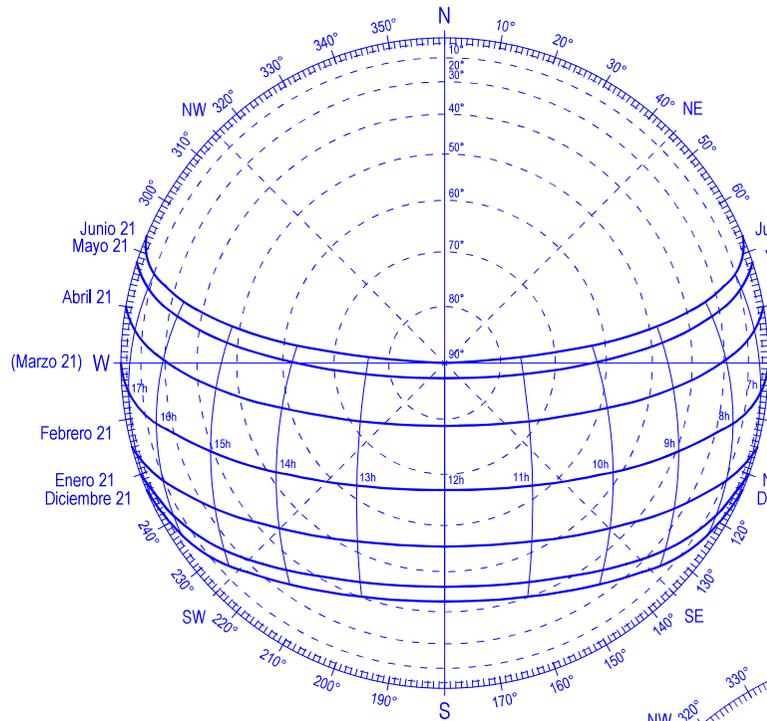


Figura 69. Proyección de ejes cartesianos. Ecuador terrestre (0°).



Trópico de Cáncer (+23,44°)

Figura 70. Proyección ortogonal o esférica. (arriba a la izquierda).

Figura 71. Proyección equidistante (arriba a la derecha).

Figura 72. Proyección Estereográfica (abajo al centro).

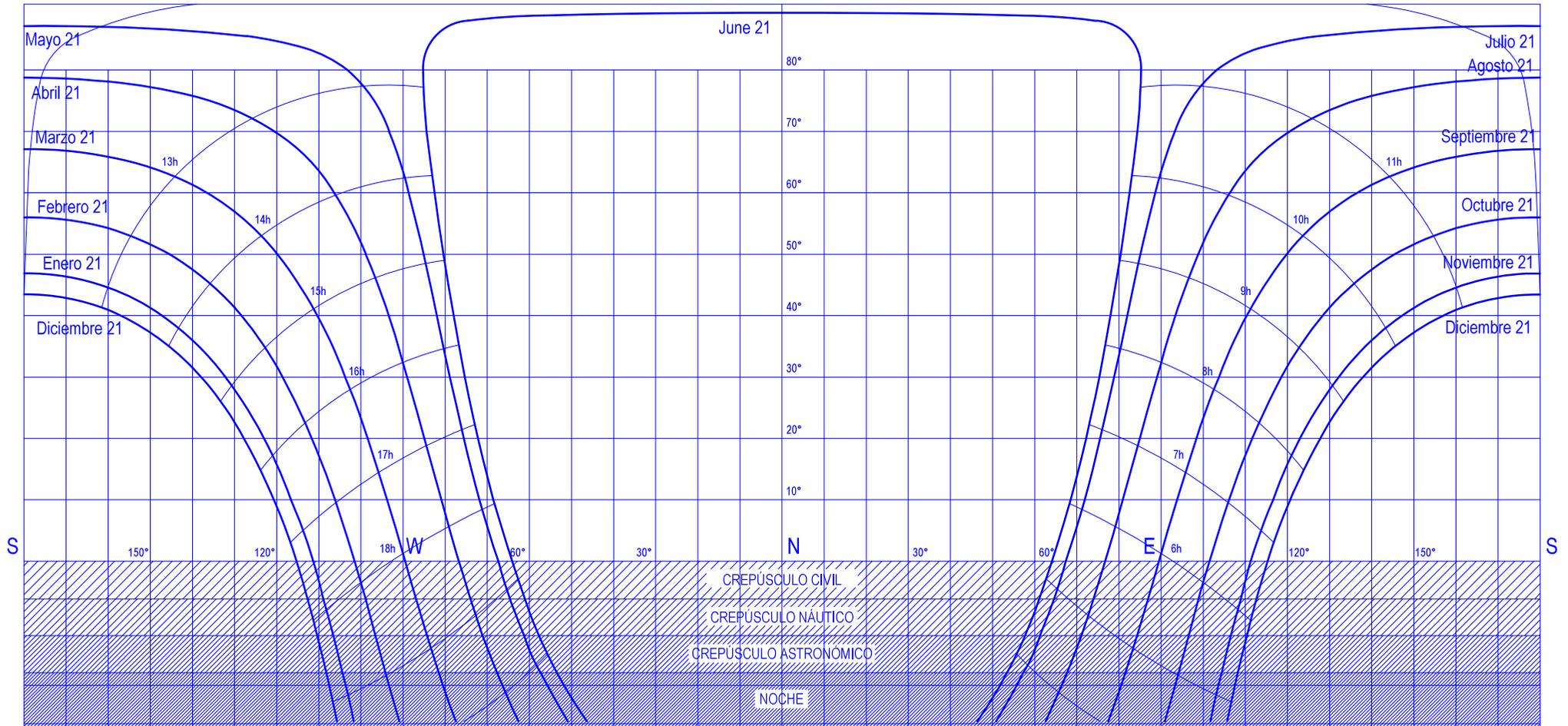
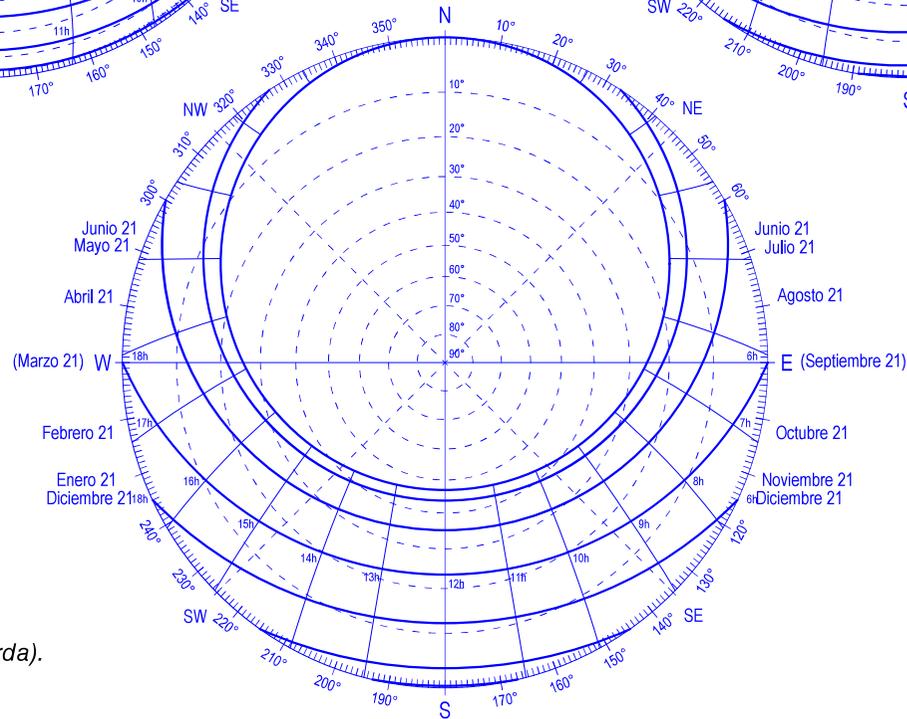
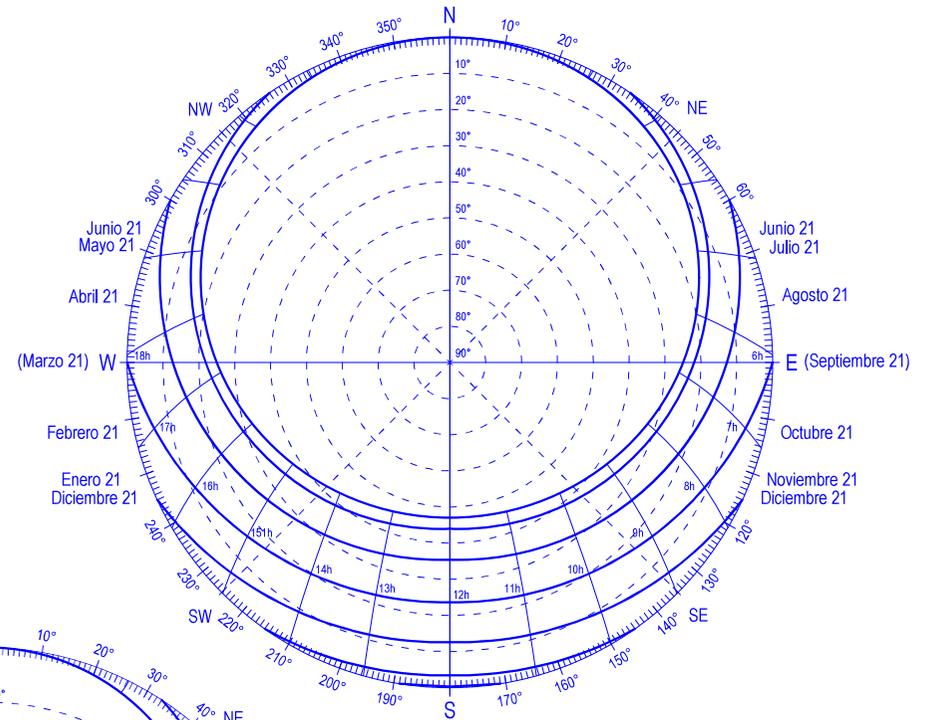
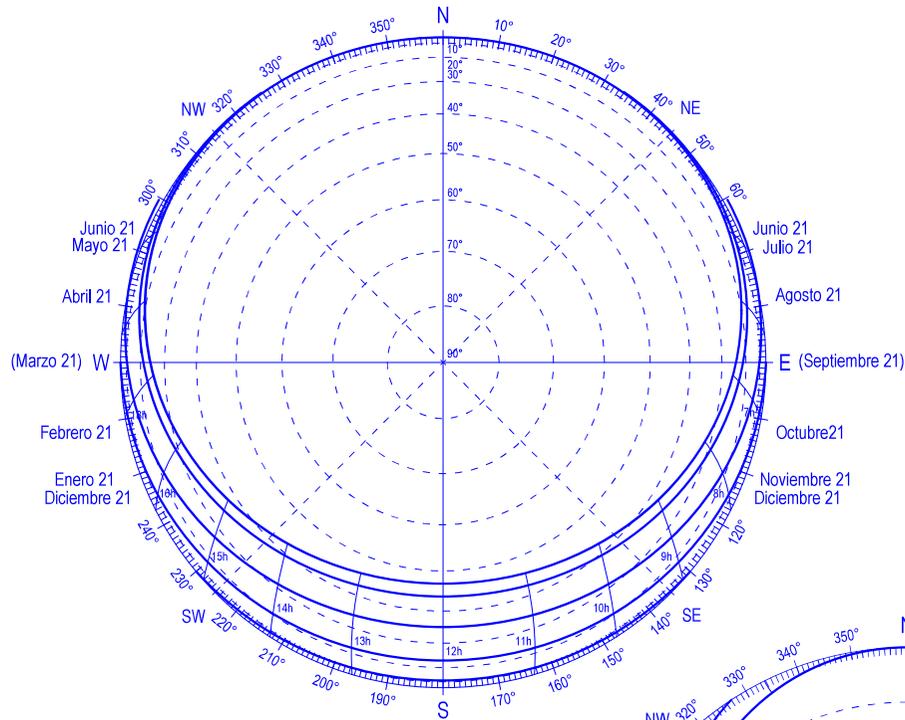


Figura 73. Proyección de ejes cartesianos. Trópico de Cáncer (+23,44°).



Círculo Polar Ártico (+66,56°)

Figura 74. Proyección ortogonal o esférica (arriba a la izquierda).

Figura 75. Proyección equidistante (arriba a la derecha).

Figura 76. Proyección Estereográfica (abajo al centro).

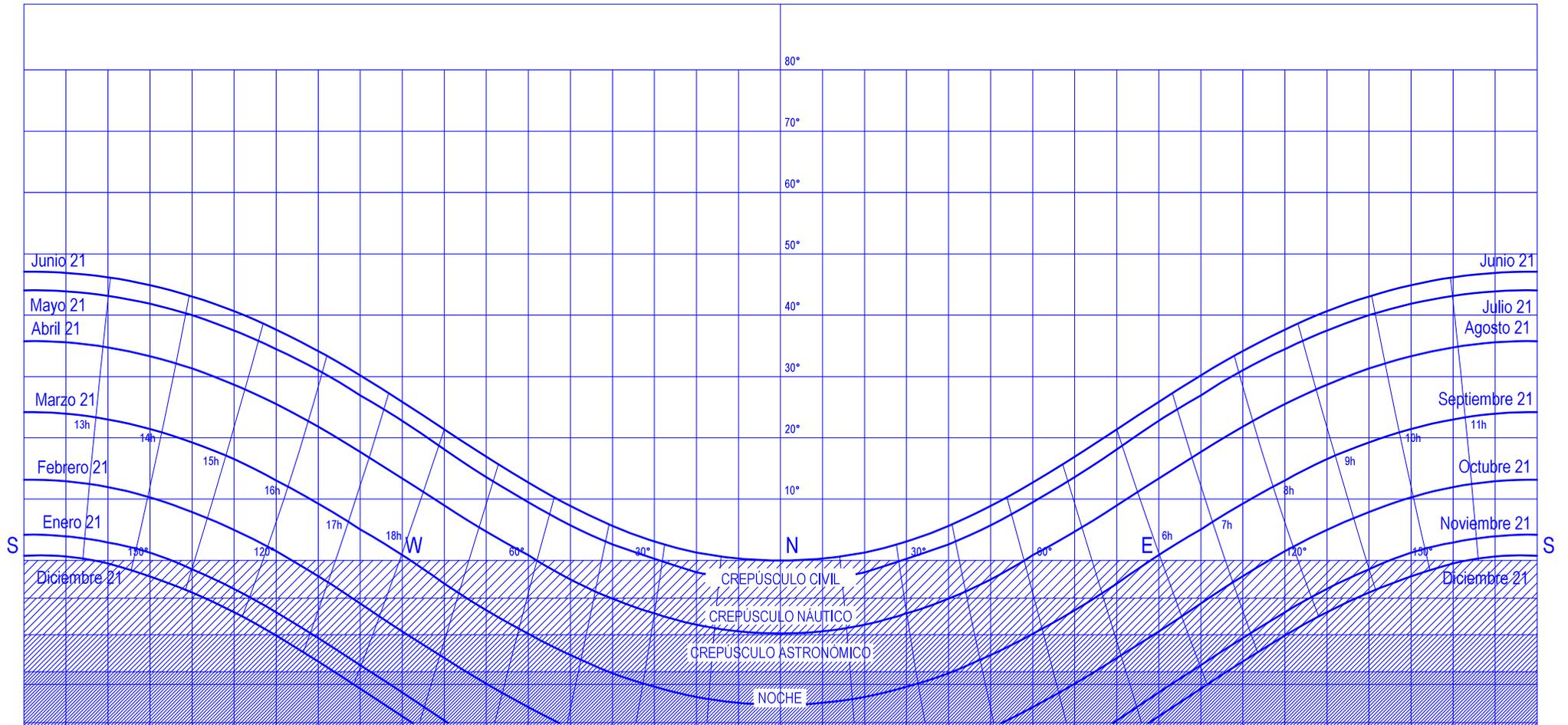
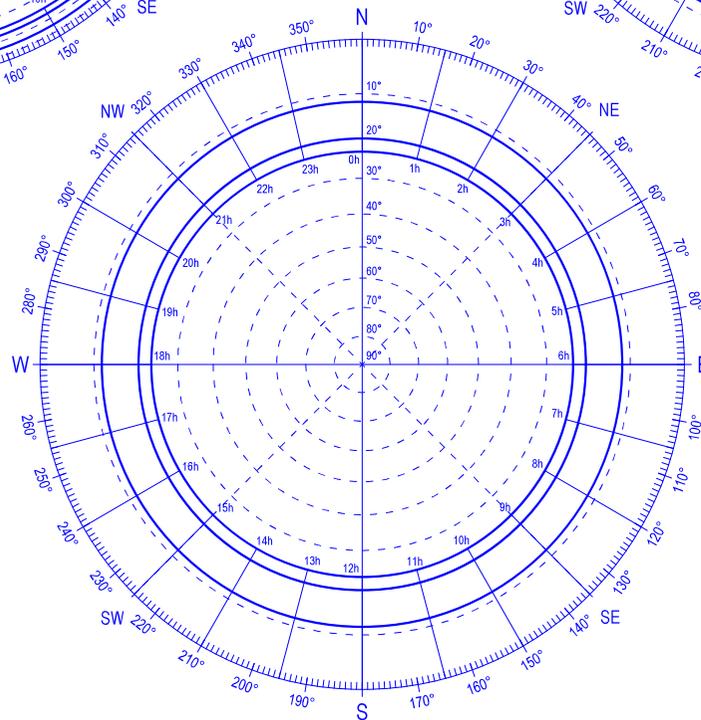
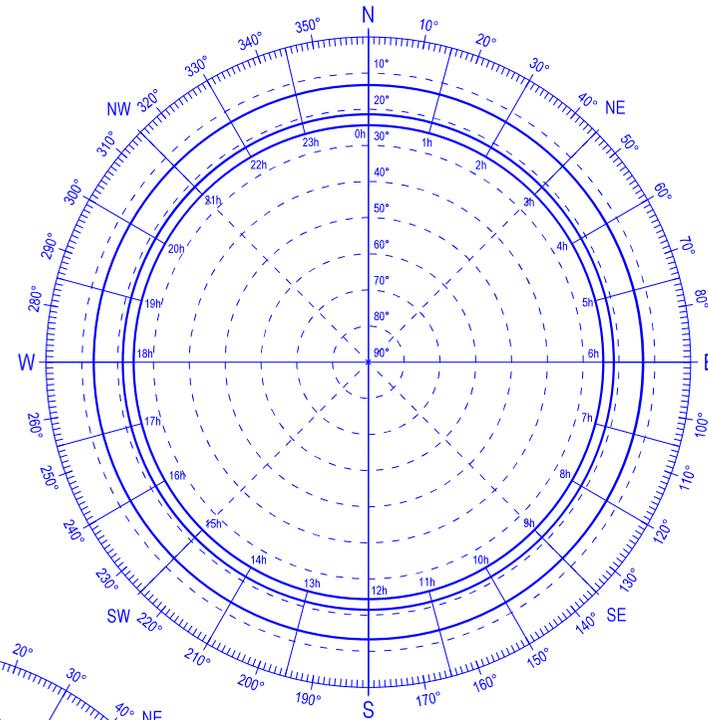
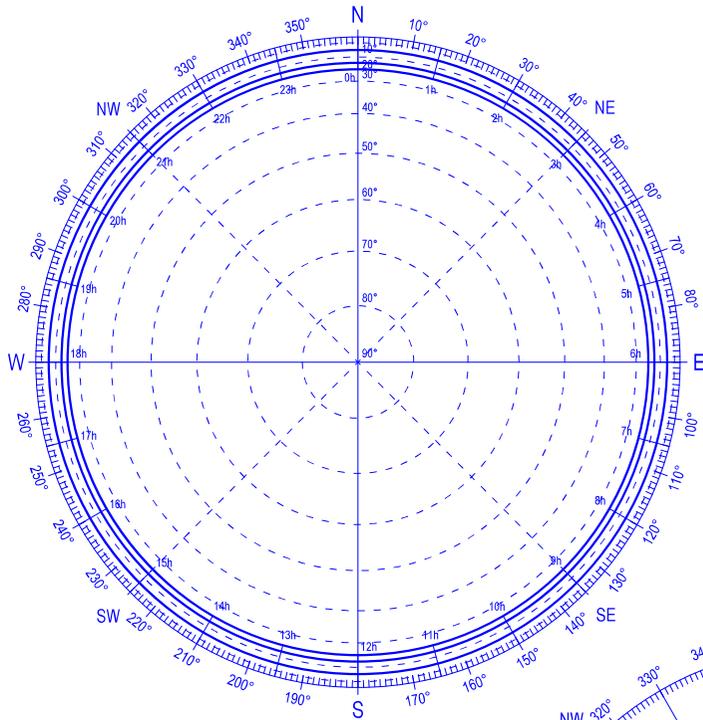


Figura 77. Proyección de ejes cartesianos. Círculo Polar Ártico (+66,56°).



Polo Norte (+90°)

Figura 78. Proyección ortogonal o esférica (arriba a la izquierda).

Figura 79. Proyección equidistante (arriba a la derecha).

Figura 80. Proyección Estereográfica (abajo al centro).

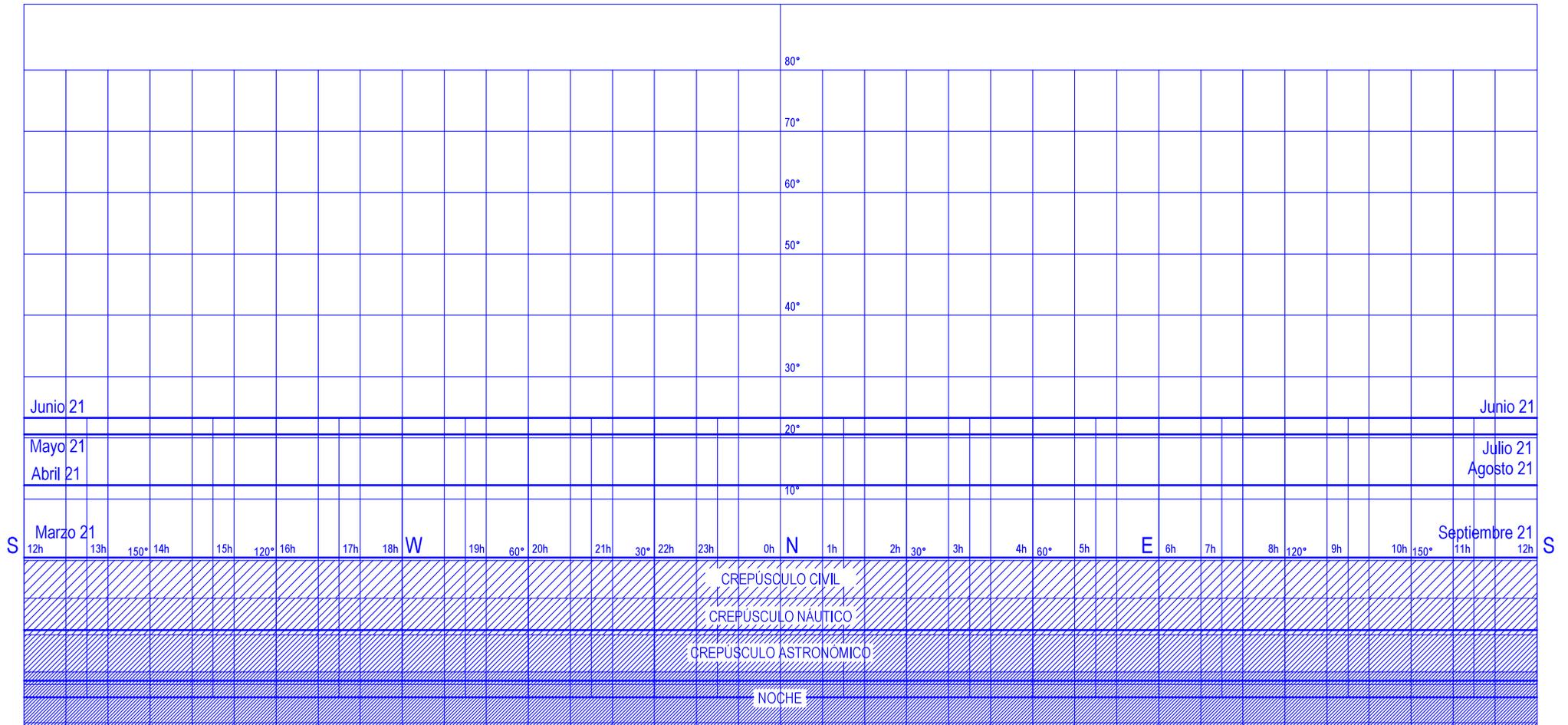
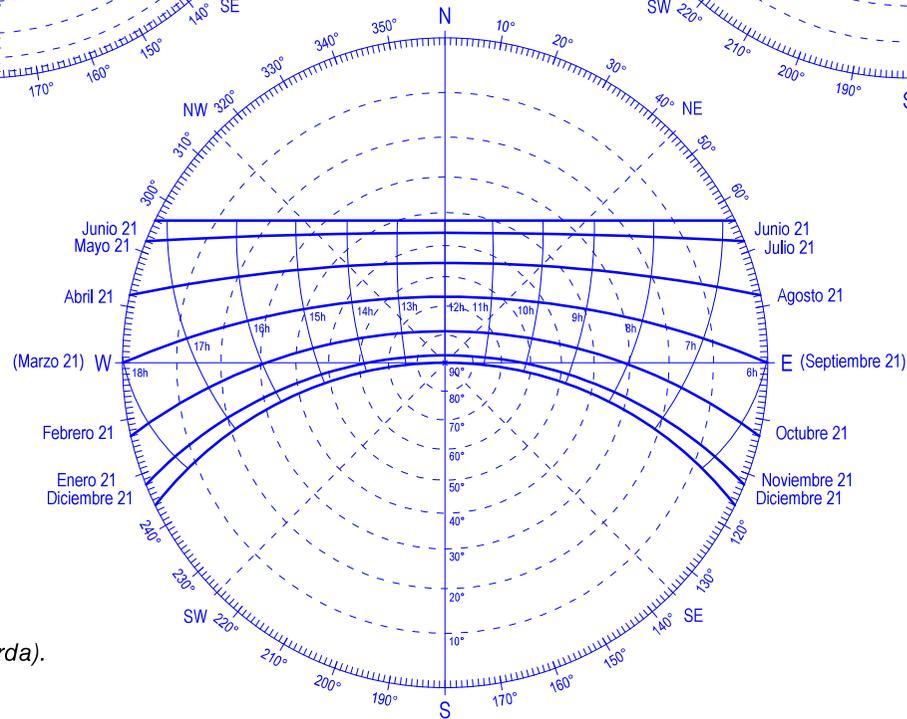
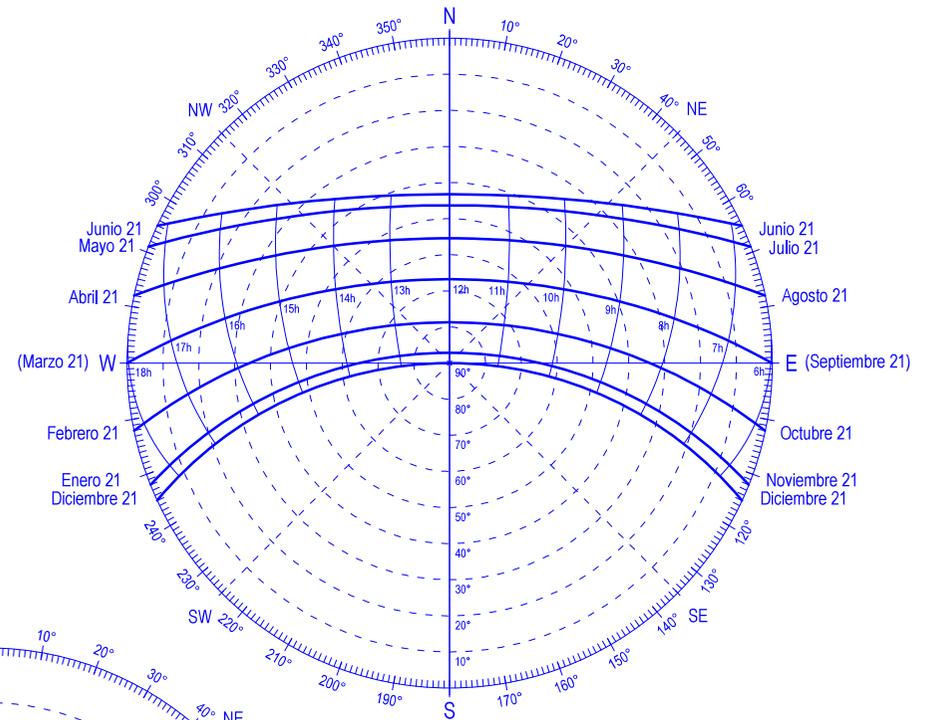
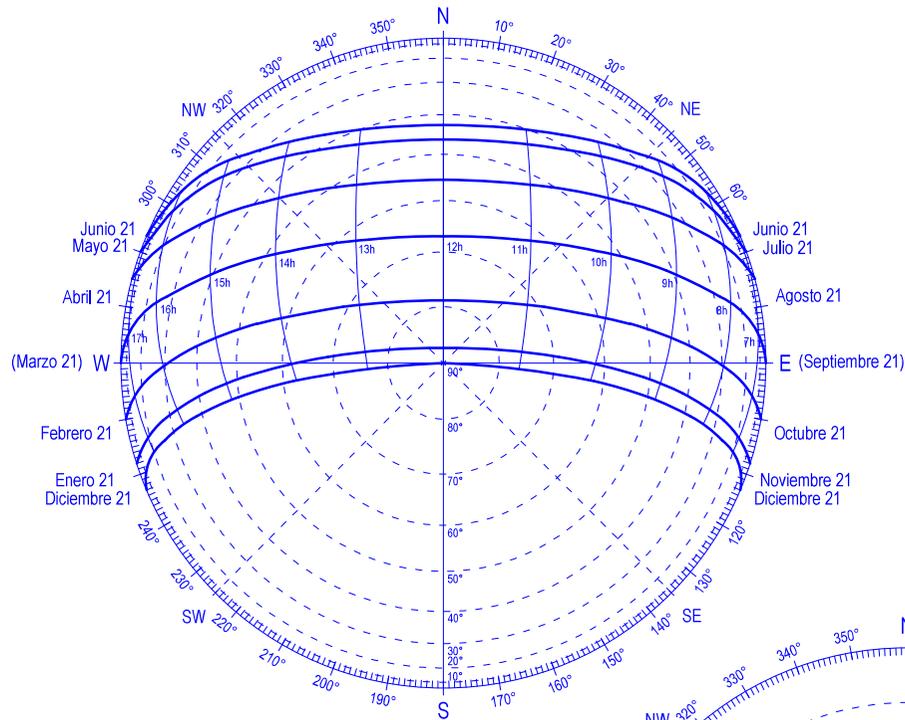


Figura 81. Proyección de ejes cartesianos. Polo Norte (+90°).



Trópico de Capricornio (-23,44°)

Figura 82. Proyección ortogonal o esférica (arriba a la izquierda).

Figura 83 Proyección equidistante (arriba a la derecha).

Figura 84. Proyección Estereográfica (abajo al centro).

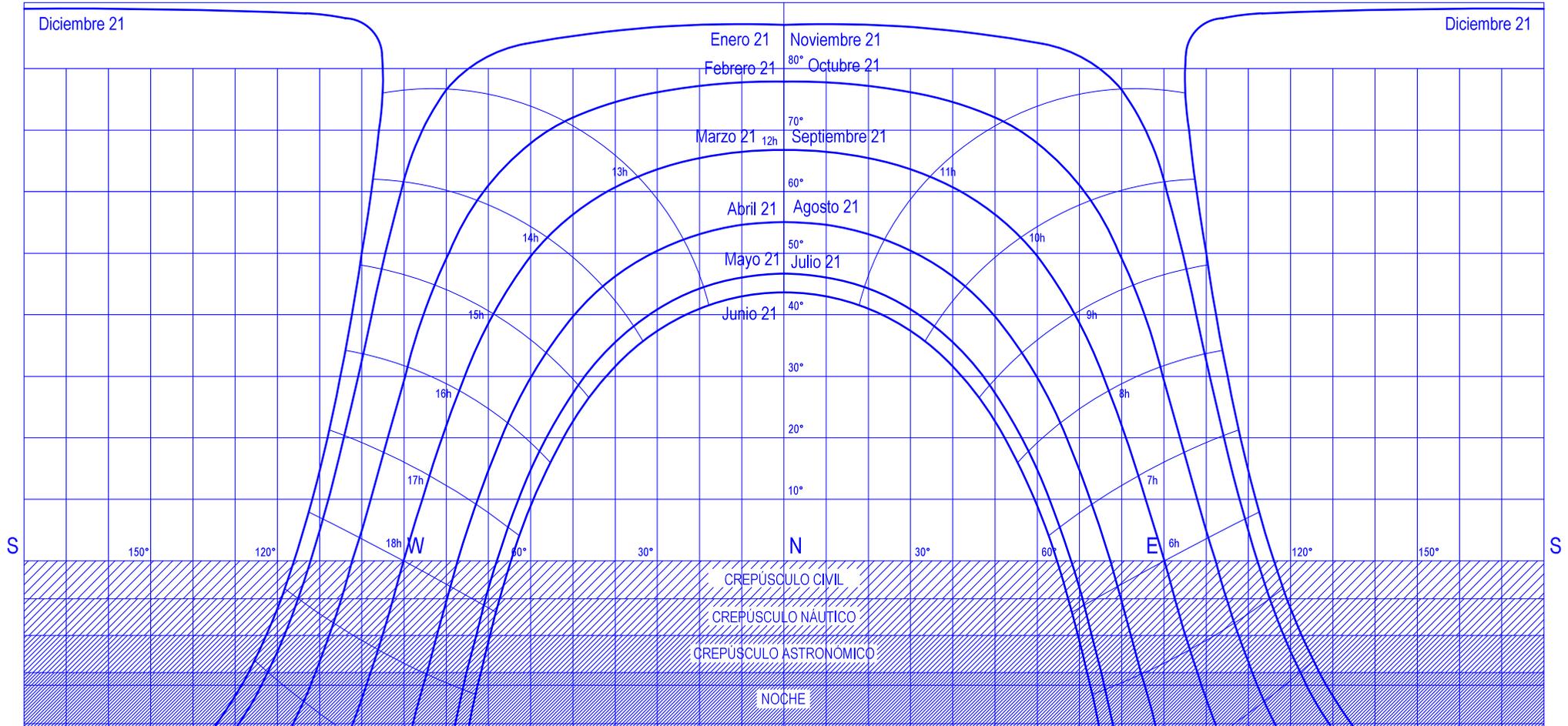
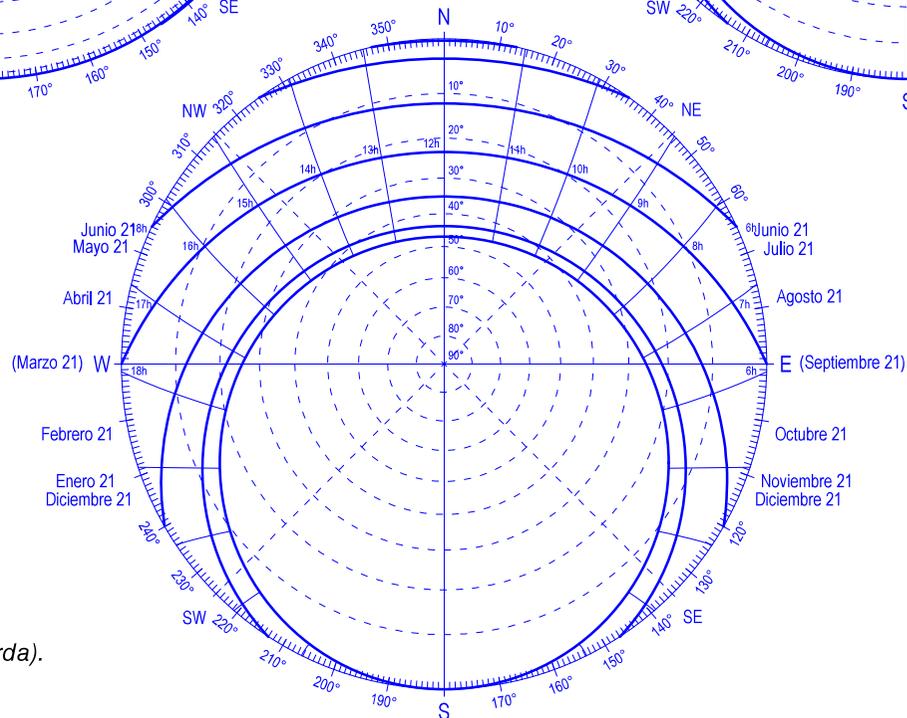
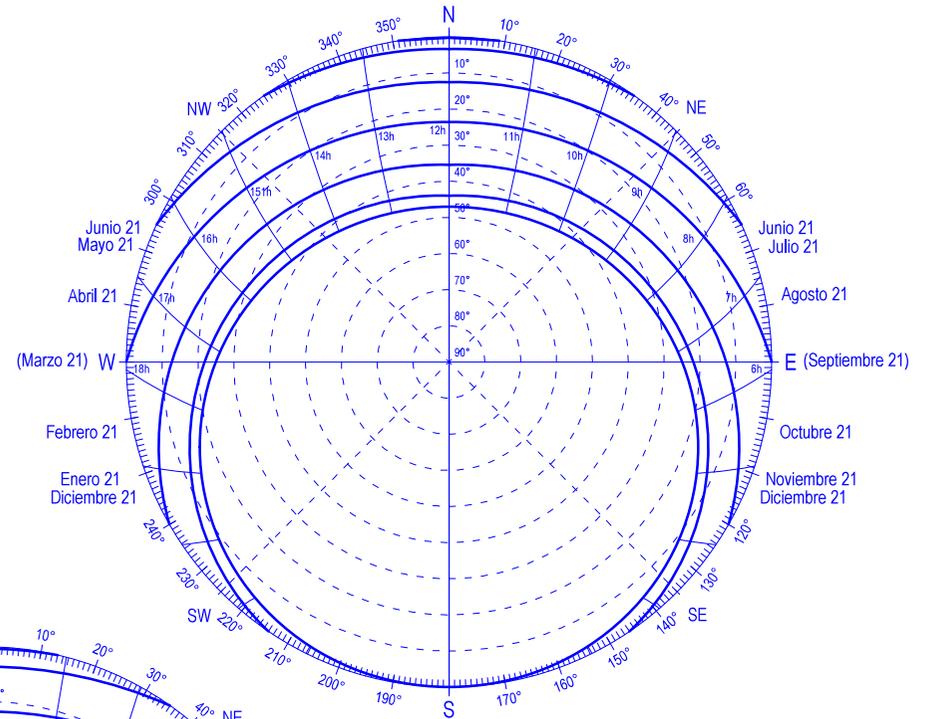
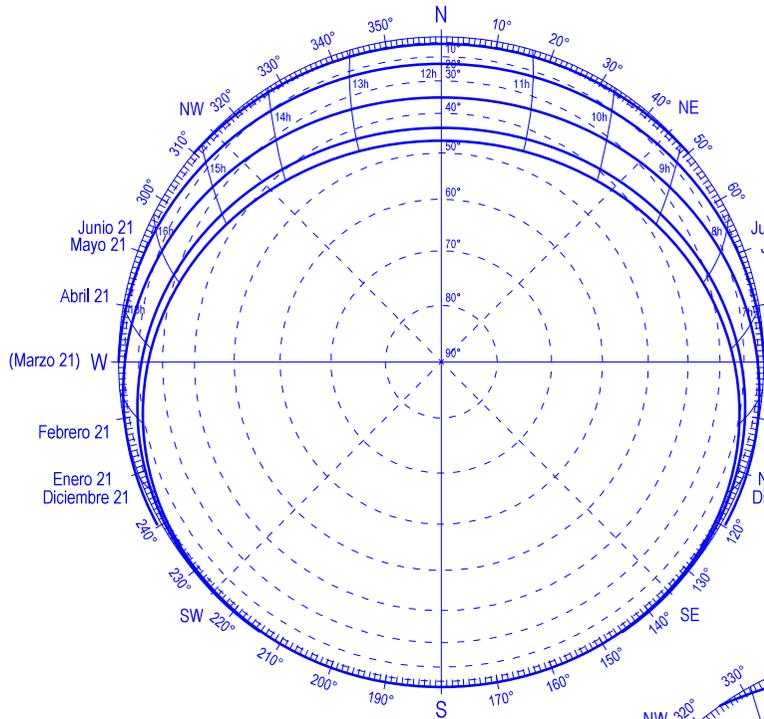


Figura 85. Proyección de ejes cartesianos. Trópico de Capricornio (-23,44°).



Círculo Polar Antártico (-66,56°)

Figura 86. Proyección ortogonal o esférica (arriba a la izquierda).

Figura 87. Proyección equidistante (arriba a la derecha).

Figura 88. Proyección Estereográfica (abajo al centro).

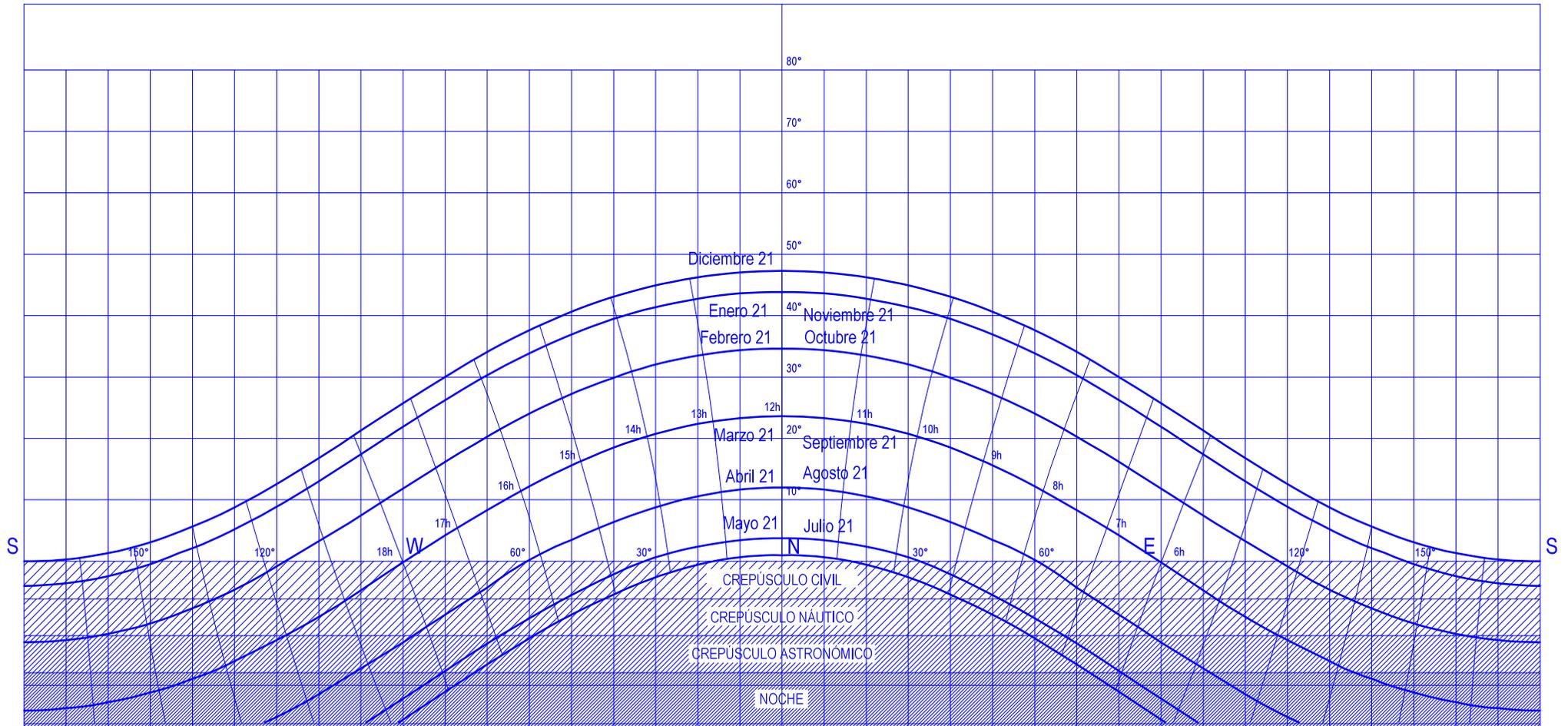
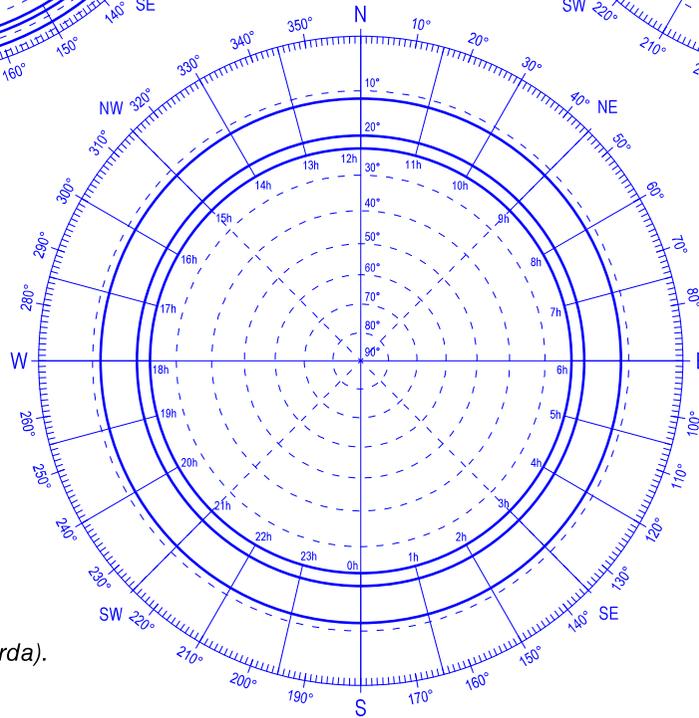
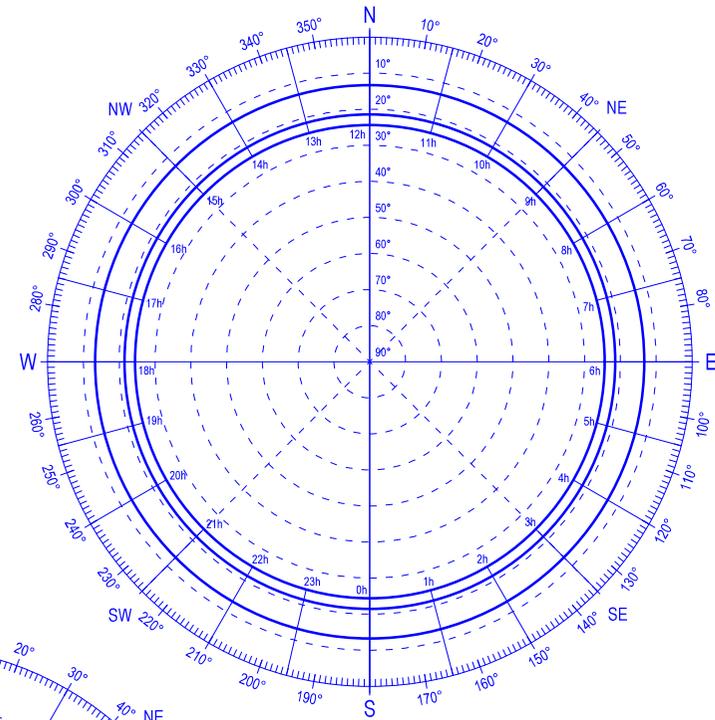
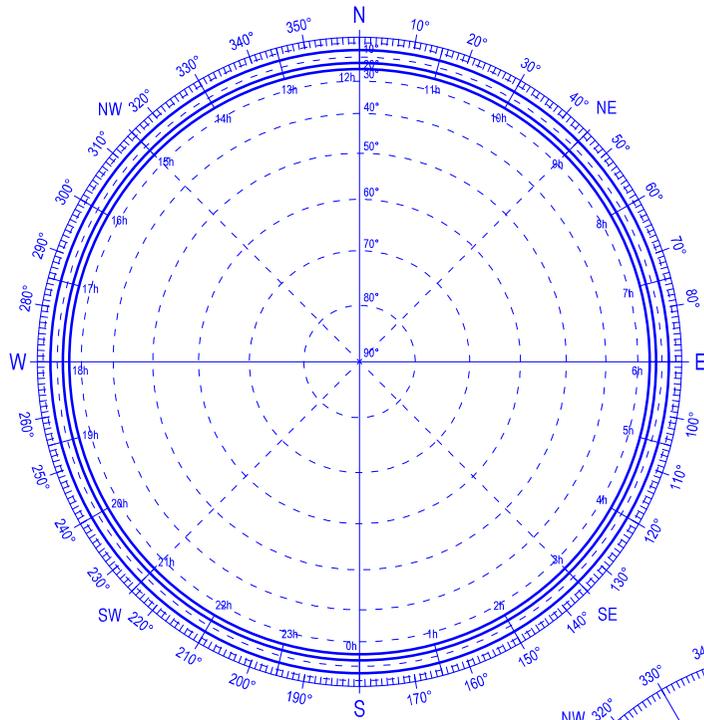


Figura 89. Proyección de ejes cartesianos. Círculo Polar Antártico (-66,56°).



Polo Sur (-90°)

Figura 90. Proyección ortogonal o esférica (arriba a la izquierda).

Figura 91. Proyección equidistante (arriba a la derecha).

Figura 92. Proyección Estereográfica (abajo al centro).

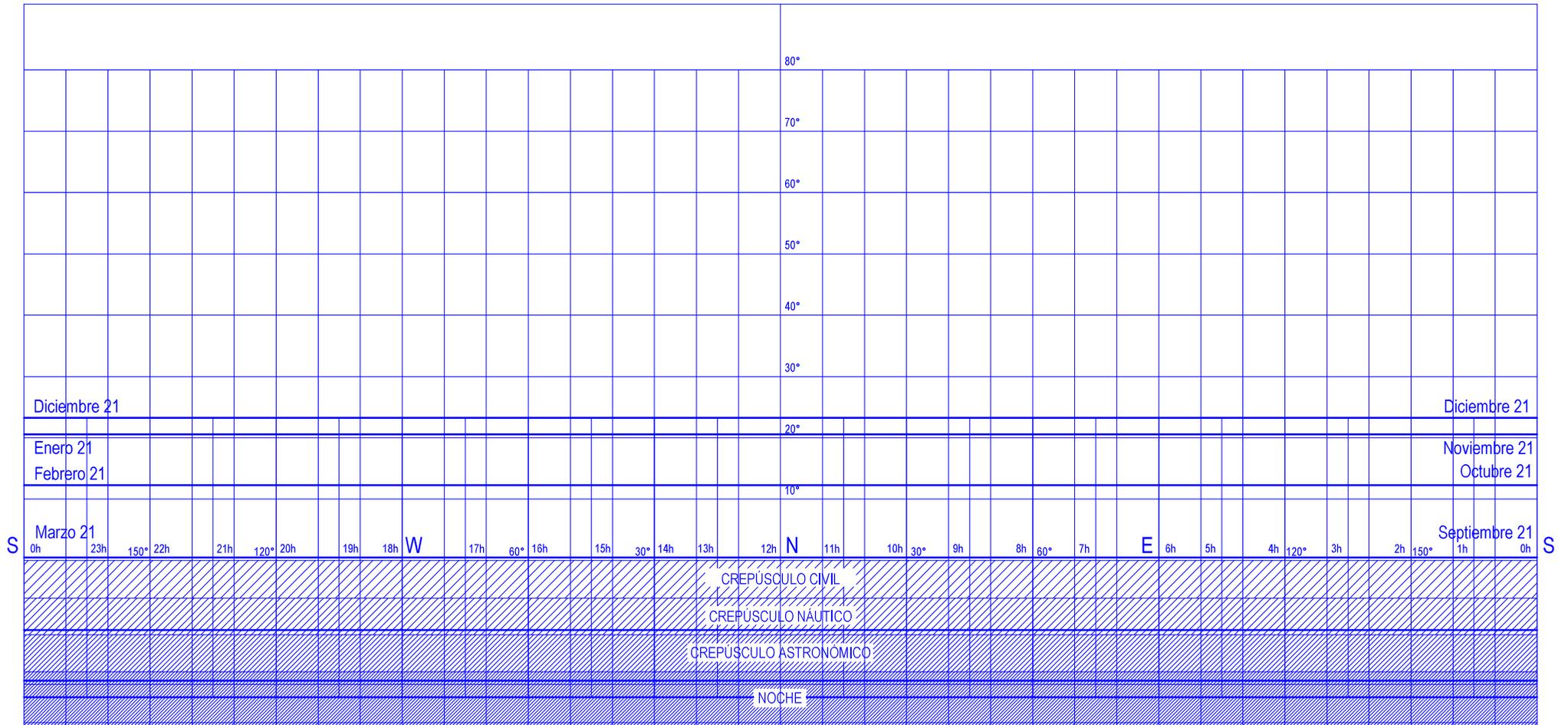


Figura 93. Proyección de ejes cartesianos. Polo Sur (-90°).

**PARTE 5.
OBRAS
DE
ARQUITECTURA
QUE
IMPLEMENTAN
EFECTOS
SOLARES**



**PARTE 5.
OBRAS DE ARQUITECTURA
QUE IMPLEMENTAN EFECTOS
SOLARES**

Memorial Caimito de Hanábana, Matanzas. Cuba.

PARTE 5. OBRAS DE ARQUITECTURA QUE IMPLEMENTAN EFECTOS SOLARES

La importancia de la luz en la arquitectura está fuera de toda duda. Los arquitectos, desde la antigüedad han dejado patente la trascendencia que tiene este elemento para la arquitectura, ejemplo de ello es la confesión de Peter Zumthor en su ensayo *Atmósferas* (Zumthor, 2019):

En lo que se refiere a la luz, natural y artificial, debo confesar que la natural, la luz sobre las cosas, me emociona a veces de tal manera que hasta creo percibir algo espiritual. Cuando el sol sale por la mañana –cosa que no me canso de admirar, pues es realmente fantástico que retorne cada mañana– y vuelve a iluminar las cosas, me digo: ¡esa luz, esa luz no viene de este mundo! No entiendo esa luz. Tengo entonces la sensación de que hay algo más grande que no entiendo. Siento un gozo inmenso y estoy infinitamente agradecido de que haya algo así.

La luz es el material más económico del que disponemos los arquitectos, además es el que permite comprender el espacio, pues nuestros ojos evolucionaron para ver las formas resultantes de la luz y las sombras proyectadas sobre estas. Según nos transmite José Flores en su artículo: *El uso consciente de la luz en la arquitectura a través de varios espacios romanos* (Flores Soto, 2011):

Además de permitirnos la experiencia de lo real, la percepción y el conocimiento del mundo en que vivimos, la luz nos da cuenta del paso del tiempo. Incidiendo sobre los objetos, la luz construye el tiempo. A través de ella tomamos consciencia de su transcurrir sin pausa; de su linealidad y de su comportamiento cíclico.

En la presente obra, se ha tratado a la iluminación solar desde la cuestión de cálculo y diseño, por tal motivo, en esta parte se hará, mediante algunas obras escogidas, un análisis del empleo de esta, de cómo la luz solar puede ser portadora de un discurso arquitectónico con fuerte carga simbólica, que permita que la obra adquiera otro pliegue más, una mística fantástica que provoque que la edificación conmueva al mismo tiempo que funcione.

Estas cualidades que se derivan del uso correcto de la luz hacen que sea un ingrediente fundamental para realizar una buena arquitectura, por tal motivo, el conocimiento del movimiento aparente del Sol y de cómo determinar su posición para un instante determinado, puede marcar la diferencia y convertir en trascendental una obra de arquitectura.

Para complementar el libro se presentan una serie de obras de arquitectura que ponen de manifiesto, de una manera u otra, efectos de iluminación solar. Algunas de estas edificaciones solo utilizan los rayos solares en las posiciones elementales cómo, por citar varios ejemplos, el paso del sol por el cenit, la salida o puesta del Sol, o, simplemente, el paso del Astro Rey por cualquier zona de la bóveda celeste durante el año. En todos estos casos, el diseño no tuvo en cuenta el cálculo del posicionamiento exacto del Astro Rey.

De las obras presentadas a continuación, solo en los proyectos realizados por el arquitecto Domingo Alás se utilizaron efectos solares que implican un cálculo profundo, tal y como se describe en este libro; utilizando los rayos del Sol para iluminar en momentos específicos del año para una ubicación exacta, como por ejemplo el diseño de la Plaza Martiana ubicada en la provincia de Las Tunas, Cuba.

¿Sabías que?

En Cuba en la provincia de Granma, se encuentra en la puerta de una caverna la imagen en piedra de Atabeira, madre de todos los dioses y de las aguas que en ellas corren, según las creencias de los indios antillanos. Este ídolo tiene una ubicación increíble y hasta misteriosa, pues solo un día al año el sol lo ilumina completamente: el 21 de diciembre, fecha en que se produce el solsticio de invierno (Ismael Francisco, 2014).

OBRA:
PLAZA
MARTIANA
DE
LAS
TUNAS,
CUBA.



PLAZA MARTIANA DE LAS TUNAS

Obra: Plaza Martiana.

Ubicación: Municipio Las Tunas, Provincia Las Tunas. Cuba.

Autor: Arq. Domingo Antonio Alás Rosell.

Figura 94. Vista aérea de la Plaza Martiana

PLAZA MARTIANA DE LAS TUNAS

Obra: **Plaza Martiana.**

Ubicación: **Municipio Las Tunas, Provincia Las Tunas, Cuba.**

Autor: **Arq. Domingo Antonio Alás Rosell.**

Es una obra de arquitectura solar, conmemorativa y ambiental dedicada al prócer cubano José Martí en el centenario de su caída en combate. Allí se mezclan con la historia, materias que tienen que ver con las ciencias exactas tales como las matemáticas, la física y la astronomía.

La plaza cuenta con un reloj solar y un calendario que funciona asociado al movimiento de las sombras proyectadas por la luz solar. El primero, con la sombra que proyecta el gnomon sobre la escala dispuesta en el pavimento aporta la hora solar. El calendario, trazado del mismo modo en el pavimento de la plaza forma líneas hiperbólicas para cada fecha y señala con la sombra de la punta del estilo del reloj las fechas más importantes de la vida del héroe y cuatro efemérides astronómicas notables: los días en que ocurren los solsticios y los equinoccios.

El parque posee una forma irregular que se adapta a la superficie de la parcela en que ha sido emplazado; posee, además, otro componente de interés que es el soporte de la escultura de Martí formado por cinco paraboloides hiperbólicos de ferrocemento.

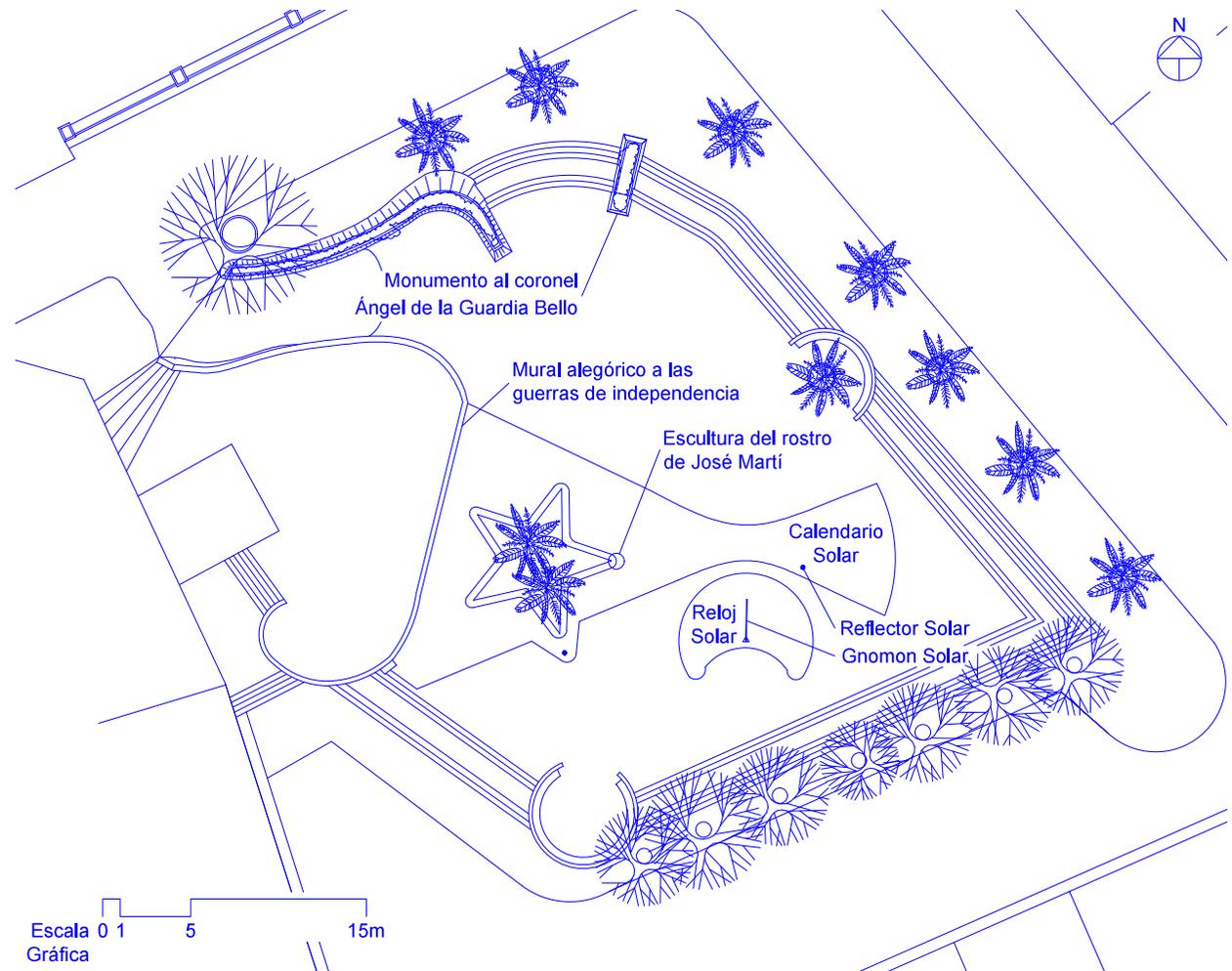


Figura 95. Esquema en planta de la Plaza Martiana.

El elemento que más llama la atención del lugar es un espejo plano que funciona como reflector solar e ilumina el rostro de la escultura de José Martí cada 19 de mayo, día en que se conmemora su caída en combate a las 2:30 PM.

Al oeste de la plaza hay un muro en el que se localiza un mural alegórico a las guerras de independencia. En un sitio preponderante de la escalinata del parque, una pirámide trunca de base rectangular sirve de soporte al monumento erigido al coronel Ángel de la Guardia Bello, único testigo de la muerte del Apóstol en el combate de Dos Ríos que luego cayera mortalmente herido en este lugar durante la última toma de Las Tunas.

Este parque solar funciona además como importante nudo de circulación peatonal ya que se halla en el mismo centro histórico de la ciudad.



Figura 96. Foto en la que pueden ser observados los tres componentes astronómicos más significativos de la Plaza Martiana de Las Tunas: el reloj solar, el calendario y el reflector solar conmemorativo. Vea como la sombra del gnomon marca simultáneamente la hora y la fecha sobre la escala del reloj y en las líneas del calendario solar. El reflector sobre el pedestal de hormigón es un espejo plano corriente sin aberración. Puede verse además la forma hiperbólica del pavimento que conforma el calendario; esta silueta se debe a la trayectoria de las sombras dentro de la franja tropical de La Tierra.

El reloj solar

Los relojes solares son los instrumentos astronómicos para la medición del tiempo más antiguos que conoce el hombre, no por ello el reloj solar de la Plaza Martiana deja de tener aspectos de mucho interés:

La línea formada por el canto o borde superior del gnomon o estilo es paralela al eje de rotación de La Tierra y pertenece al meridiano $76^{\circ}57'$ de longitud oeste y su inclinación sobre el plano horizontal coincide con la latitud de su emplazamiento que es $20^{\circ}57'$ de latitud norte. Esta posición astronómica del estilo permite que si de noche apuntamos con su borde como si fuera un fusil lo que se colima en su extremo es la Estrella Polar.

El reloj solar, como su nombre lo indica, da la hora solar ya que la hora oficial se refiere a un sol ficticio ajustado a un meridiano que, para este caso, como se ha mencionado antes es el Meridiano 75° oeste. Para determinar la hora oficial a partir de la lectura de la hora solar hay que aplicar la fórmula de rectificación horaria que aparece en una placa adosada en el extremo de gnomon.



Figura 97. La hora solar es marcada por la sombra del borde superior del gnomon o estilo del reloj en las líneas de la escala. Las marcas de este reloj se han hecho cada cinco minutos y posee dos escalas: una para el horario de verano y otra para la hora del Meridiano 75° Oeste, hora oficial de Cuba. Este marcador del tiempo solar posee un atraso permanente a causa de su posición geográfica de 7 minutos, 48 segundos y 80 centésimas que se anula alrededor de los días cercanos al 21 de septiembre y los 6 de diciembre ya que en esos días el parámetro de la ecuación de tiempo tiene similar adelanto. En el pavimento también se señalan los paralelos y meridianos más significativos de la región oriental del país.

El calendario solar

Muy interesante es el calendario solar de la Plaza Martiana que funciona con la proyección de la sombra de la punta del gnomon sobre las líneas hiperbólicas de bronce que están empotradas en el pavimento con su correspondiente señalización. Las líneas marcan, entre otras fechas, el nacimiento y la muerte del prócer, así como efemérides astronómicas tales como la ocurrencia de los días de solsticios y equinoccios.

Forma parte del calendario solar, además, una regla de bronce empotrada en el pavimento con 65 efemérides marcadas con líneas de un milímetro de ancho más la correspondiente fecha representada con números troquelados. Esta escala está dentro del mismo meridiano a que pertenece el gnomon. El día de cada una de esas fechas y a la hora que pasa el Sol por el referido meridiano, con precisión cronométrica, la sombra del extremo del gnomon señala la fecha.



Figura 98. Vista del conjunto.



Figura 99. La sombra del extremo del gnomon marca en las líneas hiperbólicas del calendario las principales efemérides. La raya más al sur indica el momento del solsticio de verano. La única línea recta nos indica la ocurrencia de los equinoccios y la que está más al norte anuncia el inicio del invierno. Otras marcas nos hablan de Martí y su obra. Los días 21 de cada mes son significativos porque esas jornadas se parean de forma homóloga, por ejemplo, enero y noviembre, febrero y octubre, marzo con septiembre y abril con agosto; esto quiere decir que son días con similar trayectoria solar. Las coincidencias han hecho que el día 19 de mayo, muerte de Martí se homologue con el 26 de Julio, de manera que ese día la sombra del gnomon se mueve exactamente por la marca correspondiente a la fecha de la caída del Apóstol y sea iluminada la escultura por el reflector solar a las 2:39 PM. Un grupo de círculos concéntricos dispuestos también en el pavimento, definen los lugares geométricos correspondientes a determinados intervalos de altura solar. En los casos del calendario y el reloj solar, el piso es de terrazo integral.



Figura 100. En esta foto se muestran varios de los elementos descritos: Se nota cómo la sombra del extremo del gnomon marca un equinoccio en la línea recta del calendario; se ve además la escala metálica meridiana que ha sido empotrada en el piso para registrar 65 de las más célebres efemérides martianas. En la escala se indica cada uno de esos días durante el paso del Sol por el meridiano de la plaza. Podemos observar que de forma simultánea la sombra del gnomon da la hora en la escala del reloj solar. La sombra del reflector se proyecta también sobre el piso del calendario. Al fondo, el monumento a José Martí, cuya mascarilla de bronce fue modelada por la insigne escultora Rita Longa; la base de esta escultura forma una estrella que se levanta buscando la luz; cada uno de sus componentes se erigen formando un paraboloides hiperbólico de ferrocemento, estructura que manifiesta la paradoja entre la delicadeza y la fortaleza, atributos distintivos del carácter de José Martí. La enseña nacional ocupa un sitio destacado y junto a las palmas ponen de manifiesto la cubanía. El muro posterior muestra pensamientos del héroe referidos a la luz, la guerra y el tiempo y muestra un mural cerámico que alude a las luchas independentistas.

El reflector solar

Martí en sus versos sencillos pidió morir de cara al Sol, lo que significa caer dignamente, como en realidad lo logró el domingo 19 de mayo de 1895 en el combate de Dos Ríos estando acompañado del combatiente mambí Ángel de la Guardia Bello.

En La Plaza Martiana hay un reflector solar conmemorativo, especialmente diseñado para recordar la efeméride: consiste en un espejo plano ubicado astronómicamente de tal forma que a las 2:30 PM de cada aniversario de su muerte, la luz solar que incide en él es reflejada y se proyecta en la cara de la escultura. Esta luz, unas horas antes de iluminar el rostro del Maestro, se va moviendo lentamente por el pavimento y el soporte de la imagen hasta que llega, justo a tiempo, a enfocar el bronce de la mascarilla.



Figura 101. Foto del reflector solar. Se observa el espejo y el dispositivo de ajuste- sujeción y que permite el emplazamiento exacto de la superficie reflectante para el logro de la iluminación de la escultura. El sencillo mecanismo permite movimientos de rotación horizontal y vertical y “arriba-abajo” en dos sentidos haciéndolo apto para ser colocado en la posición que por diseño se ha determinado por los cálculos astronómicos y ópticos. Los ángulos de altura solar y acimutal fueron capitales en la concepción de este aparato.

El efecto de la reflexión solar los 19 de mayo ha convertido a La Plaza Martiana de las Tunas en un sitio de obligada visita. Desde horas tempranas ocurren ese día actos de recordación que diferentes entidades, organismos y organizaciones desarrollan con el fin de esperar el momento exacto de la caída de Martí y ver el fenómeno astronómico que allí ocurre. Personas de disímiles procedencias, convocadas por la curiosidad y las ganas de aprender un poco de historia se reúnen allí para homenajear al Maestro.



Figura 102. Fotografía tomada el 19 de mayo del año 2000 a las 2:27 de la tarde. Obsérvese cómo la luz que refleja el Espejo está irrumpiendo en el rostro de la escultura. El reflector ubicado a diez metros de la efígie y a una altura de tres metros tiene un ángulo de inclinación vertical que responde al parámetro altura solar. La alineación del punto centro del reflector y el centro de los arcos superciliares de la escultura está definida por el ángulo acimutal del Sol para esa hora y fecha. Este efecto, esperado todos los años por un nutrido grupo de amantes de las tradiciones y la ciencia astral, puede observarse durante 15 minutos desde que comienza hasta su fin. Primero, el haz de luz alumbró el pavimento del calendario hasta que llega al soporte y lo remonta hasta que hace contacto con la pieza de bronce iluminándola de forma plena.



Figura 103. Secuencia fotográfica tomada el 19 de mayo en horas cercanas a las 2:27 de la tarde en la que se muestra el movimiento de la sombra hasta llegar a la efígie del prócer.



Figura 104. Plaza Martiana vista el día conmemorativo de la muerte de José Martí Pérez.

OBRA:
MEMORIAL
CAIMITO
DE
HANÁBANA,
MATANZAS,
CUBA.

MEMORIAL CAIMITO DE HANÁBANA

Obra: Memorial Caimito de Hanábana, proyecto solar de arquitectura conmemorativa y ambiental dedicado a José Martí en el 150 Aniversario de su natalicio.

Ubicación: Municipio Calimete, Matanzas. Cuba.

Autor: Arq. Domingo Antonio Alás Rosell.



Figura 105. Memorial Caimito de Hanábana, Matanzas. Cuba.

MEMORIAL CAIMITO DE HANÁBANA

Obra: Memorial Caimito de Hanábana, proyecto solar de arquitectura conmemorativa y ambiental dedicado a José Martí en el 150 Aniversario de su natalicio. **Ubicación:** Municipio Calimete, Matanzas, Cuba. **Autor:** Arq. Domingo Antonio Alás Rosell.

Este memorial, es consecuencia de La Plaza Martiana de Las Tunas y aunque su diseño está basado en los mismos principios científicos y técnicos, se ha resuelto en un interior a diferencia del espacio abierto del parque solar tunero. Se quiso pues, hacer algo similar en Caimito de Hanábana, lugar en que vivió Martí y escribió su primera carta conocida. Fue allí donde conoció los horrores de la esclavitud y por eso juró en sus versos "...lavar con su vida el crimen..."

Aquí se vincula el cálculo matemático con juicios físicos y ciertos conceptos cinemáticos del movimiento solar a materias que van desde la Cartografía y la Geodesia hasta la Historia.

Existe allí un calendario en el interior de un espacio que señala 110 efemérides relacionadas unas con Martí y eventos astronómicos que se indican a la hora y fechas predeterminadas con la proyección de rayos solares sobre una escala esculpida en mármol.



Figura 106. Vista general del Memorial Caimito de Hanábana dedicado a conmemorar la estancia de José Martí en el lugar cuando era un niño y donde escribió su primera carta conocida. La forma de la edificación la ha definido la incidencia solar del 23 de octubre en el momento de la culminación solar a las 12:07 horas. Se pueden observar en la cubierta sur del edificio los tragaluces que producen este efecto.

El 23 de octubre, día en que escribió Martí su primera carta conocida en 1862, el 18 de febrero, el 28 de enero día de su natalicio y el 19 de mayo día de su muerte; son fechas que se destacan por la entrada de luz solar a través de conductos fijos en la cubierta del edificio y cuyos haces se proyectan sobre láminas, que están en pedestales convenientemente ubicados en el interior del espacio teniendo en cuenta las leyes del movimiento del Sol.

Música indirecta, efectos de sonido, alteraciones de temperatura y cambios de coloración por luz monocromática artificial y natural tamizada por vidrios coloreados, son parte de los complementos de este memorial donde ciencia, técnica, historia y fantasía se unen para lograr una inolvidable visita a un excepcional sitio de nuestra geografía.

Concepción general de la instalación. La carta del 23 de octubre y los versos sencillos número XXX son la base conceptual del proyecto. Téngase en cuenta que la esquila fue hecha por un niño de nueve años y que los versos pudieron ser estimulados por la impresión recibida en ese lugar donde se ponía de manifiesto con toda crudeza la esclavitud y la trata.

El memorial se proyectó para perpetuar en el tiempo el recuerdo de la estancia en Calimete de nuestro Héroe Nacional de Cuba.

El diseño tiene en cuenta la principal categoría ética de Martí: la dignidad. Se conoce que los términos luz y Sol los utiliza Martí como sinónimos de dignidad y esta palabra posee la raíz sánscrita “dig” que quiere decir luz.

Martí y la luz son, entonces, los principales protagonistas de esta obra.

Para explicar cómo funciona el sistema partiremos de la orientación del edificio y su ubicación geográfica: su eje longitudinal está en una línea meridiana conocida evidentemente, en una alineación norte – sur, lo que permite determinar con toda precisión, la hora en que el Astro Rey pasa por ella cada día, instante de la culminación solar, en que sucede la penetración plena de la luz en el interior del espacio.

Su latitud, también conocida, permite calcular el ángulo de incidencia solar cuando el Sol pasa por el meridiano, o lo que es lo mismo, determinar la altura de culminación para cada día del año y con ello proyectar el ángulo de los tragaluces, la posición de los pedestales y las marcas del calendario.

Los tragaluces. Para conmemorar el 23 de octubre, se situaron tragaluces en la cubierta del inmueble cuya orientación astronómica permite la entrada de luz solar en la hora y fecha previstas. Los rayos, al penetrar, inciden en pedestales ubicados convenientemente en el interior del espacio. En cada podio se ubicaron imágenes de los elementos que Martí refiere en su carta.

El efecto que se repite los días 18 de febrero, día homólogo del 23 de octubre, se aprovechó para situar documentos e imágenes en otros pedestales que tienen que ver con efemérides ocurridas en fechas similares.

Calendario Solar por perforación

Este calendario está compuesto por dos elementos: Uno, situado en el techo del edificio: el “tragaluz del calendario” que tiene forma de cuña abierta en su base y una de las aristas. La luz solar entra por su base y sale por la arista abierta en forma de hendidura lineal incidiendo a la hora del paso del Sol por el meridiano en el otro elemento: la escala de mármol; allí se encuentran grabadas las fechas y horas en que ocurre cada efeméride.



Figura 107 Pedestales con sus láminas incorporadas. Obsérvese la sencillez del diseño, el piso de gres cerámico rojo, el enchape de madera en las paredes de color blanco. A esas láminas llegan en ciertas horas y días del año los rayos solares en franca recordación de importantes efemérides en la vida de José.



Figura 108. Tragaluces vistos desde el exterior. Son conductos hechos de acero que permiten la entrada de luz solar en determinadas fechas del año para iluminar en el interior láminas colocadas en los pedestales situados de forma adecuada acorde a efemérides previamente escogidas luego de una selección histórica.

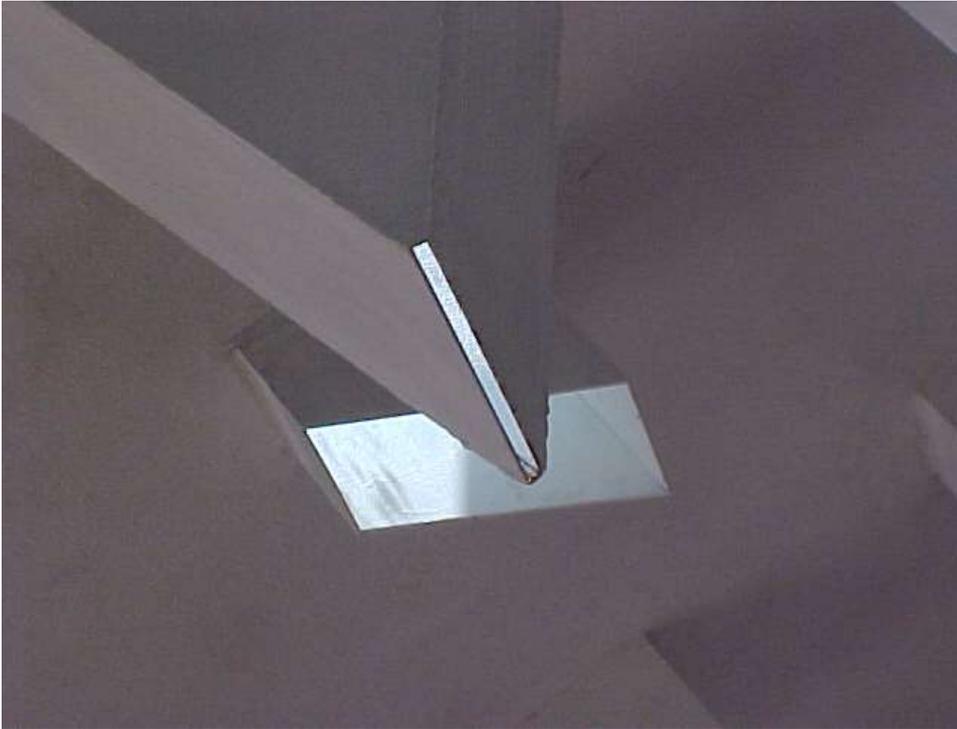


Figura 109. Tragaluz del calendario, véase la entrada de luz por la arista inferior. Detrás, un tragaluz ordinario. La luz que pasa por esta abertura incide en un rótulo esculpido en la escala del calendario con la fecha prevista y a la hora predeterminada. Todos estos conductos están protegidos por cristales transparentes que evitan el paso del agua, polvo, insectos o cualquier otro elemento indeseable dentro del memorial.

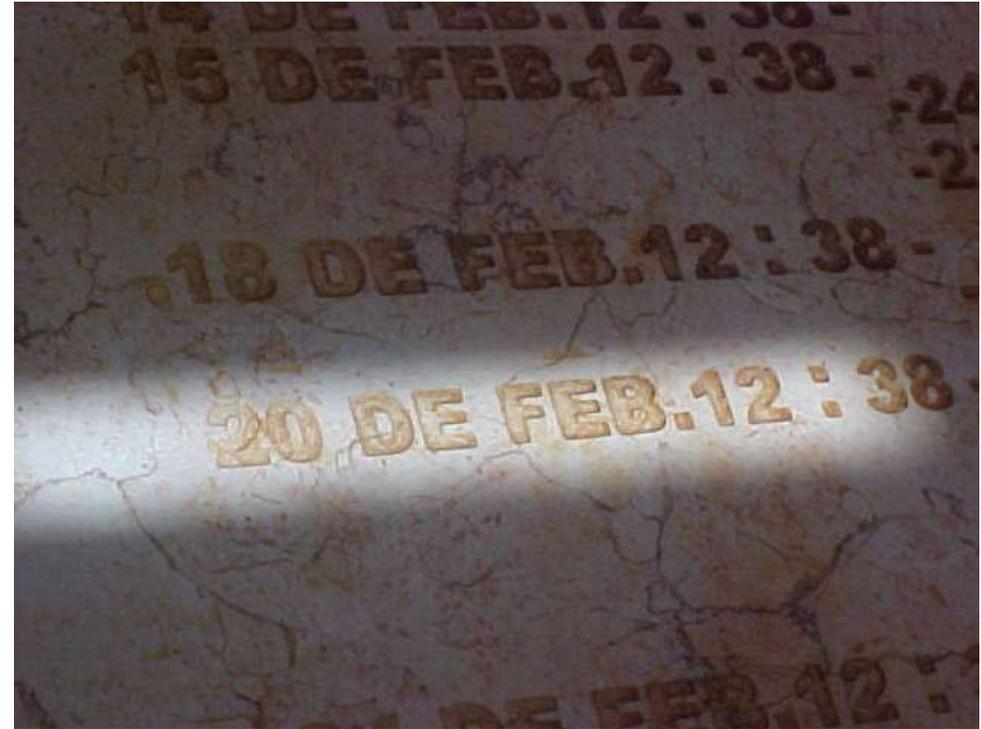


Figura 110. Escala del calendario esculpida en una pieza de mármol, véase como la luz marca una fecha y una hora. La luz que avanza a diario por la escala señala las efemérides independientemente de la presencia de personas ya que su funcionamiento depende del mecanismo universal y natural del movimiento de La Tierra alrededor del Sol; no obedece a que alguien lo ajuste en tiempo como se procede con otros ingenios homólogos a base de complicados dispositivos mecánicos o electrónicos.

Tragaluzes del 28 de enero y 19 de mayo, nacimiento y muerte de José Martí

Aparece un tragaluz para el 28 de enero y en el interior del espacio se situó un pedestal con una foto de la casa natal de Martí que se ilumina ese día en el momento de la culminación solar; también, para el 19 de mayo se procedió de igual forma con un tragaluz, un pedestal y una foto adecuados a las efemérides.

Otros efectos

Luz solar

Una porción de luz penetra a diario de forma directa en el memorial durante la culminación solar a través del calendario para marcar la fecha en la escala de mármol. Los otros tragaluzes están diseñados, además, para que la luz penetre y propicie iluminación difusa en fechas intrascendentes creando en el instante de la culminación un aumento de la claridad interior.



Figura 111. Cuando no entran los haces de luz en forma directa, los tragaluzes la difunden. En los días notables la radiación se proyecta en las láminas convenientes, por ejemplo, el 28 de enero. Se observa en esta foto, además, que no siempre la luz incide plenamente por toda la sección del conducto de luz, pero ello propicia un incremento de la iluminación interior cualquier día del año en el momento de la culminación solar para lograr un efecto sobrecogedor y místico en el interior del memorial.

Luz solar filtrada

En cada fachada se colocaron cristales, coloreados o no, para que la luz que penetre a través de ellos altere el nivel cromático del ambiente. La luz que llega del sur se reflejará en el agua de unos estanques situados al frente del edificio y al penetrar lo hará con movimiento de líquido. Este efecto luminoso dejará un agradable recuerdo en el visitante.



Figura 112. La luz solar es tamizada por los vitrales que fueron diseñados especialmente para el lugar, de esta forma, las paredes y demás elementos que están en el interior del local cambian su matiz tiñéndose con los colores que aporta la luz monocromática de cada porción vidrio.

Iluminación artificial

Para reforzar la luz natural se ubicaron reflectores rojos que incrementan gradualmente la intensidad de su flujo luminoso, con ello se logra “teñir” el ambiente con ese color. El edificio se iluminó exteriormente con luz blanca; estas luminarias se emplazaron también enfocando la copa de los árboles aledaños para destacar su follaje en la noche.

Estanques reflectores. El edificio posee en la fachada principal dos pequeños estanques que funcionan como reflectores; su función específica es enviar la luz solar en irregular movimiento hacia el espacio interior de la edificación. Son componentes funcionales para el logro de un efecto luminoso y aunque parecen hechos para mera ambientación, no es así: su forma, profundidad y color han sido creados para reflejar la luz solar.

Resumen de los efectos. Entonces, el visitante ve que a la hora prevista se marca la fecha con un haz de rayos solares, se tiñe el interior de rojo, oye una locución con música de fondo, sube la temperatura y siente sensaciones combinadas en las que intervienen la vista, el tacto y el oído. Se produce una atmósfera de atención, sobrecogimiento y admiración. Todo se hace diferente a lo cotidiano más de la cotidianeidad ha salido todo.



Figura 113. Las lámparas rojas se disimularon detrás de los pedestales. En la foto se puede observar una muestra del efecto de la luz roja en el interior del memorial; los objetos y las personas se tornan de ese color.

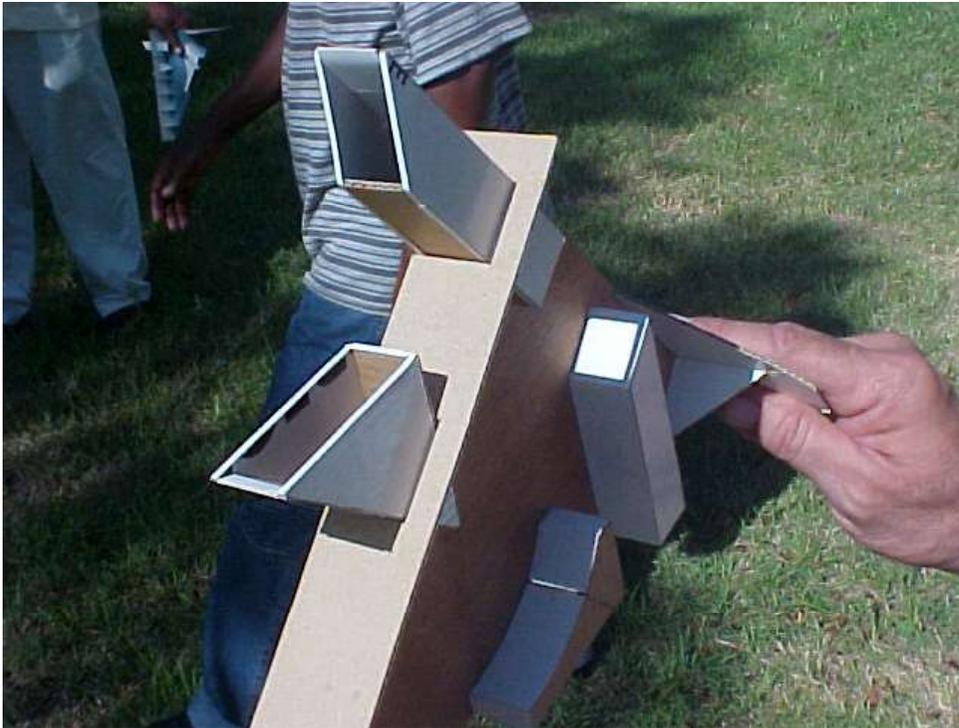


Figura 114 y 115. Cálculos de gran rigor matemático y experimentos elementales pero muy efectivos garantizaron los resultados esperados con un mínimo de gastos y un máximo de efectos positivos. A la hora pronosticada la radiación solar entra por los conductos e incide en los sitios previstos.

Este es un espacio para la meditación, para cultivar el espíritu, para revelar que las ciencias exactas pueden relacionarse con la historia en un producto de buena factura y ha devenido atracción educativa. El Memorial Caimito de Hanábana se ha convertido en un espacio importante para la elevación de la cultura.

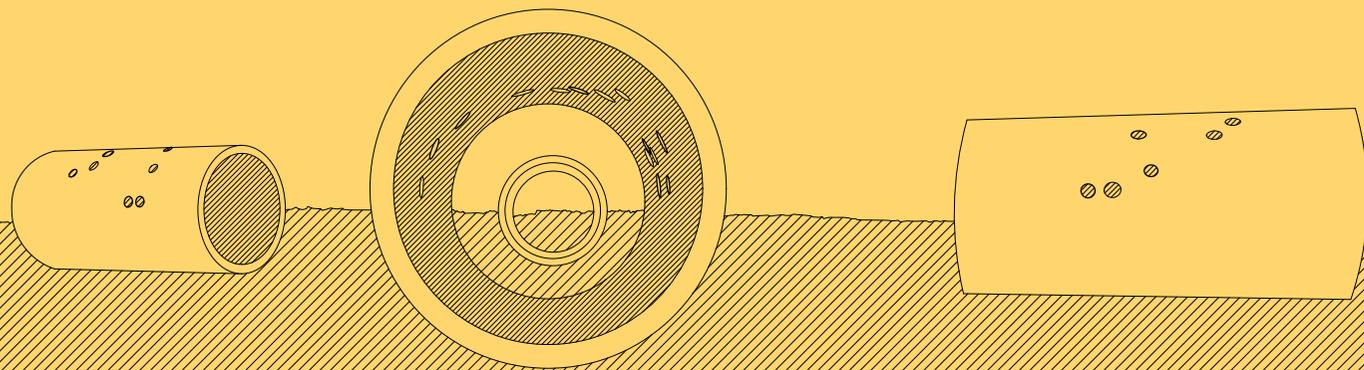
El Memorial Caimito de Hanábana logró con un mínimo de recursos un máximo de interés por su concepción personalizada. El valor de esta obra no está en la cantidad y precio de sus materiales, sino en la exquisita forma de organizarlos. Este complejo solar se creó como un cerebro cuya memoria se basa en la organización de la materia en tiempo y espacio, es decir, que los movimientos del edificio en el espacio asociados a la rotación y traslación de la Tierra, teniendo en cuenta su carácter periódico, hacen que la luz penetre al interior del edificio incidiendo en lugares específicos de acuerdo a tiempos previstos como agenda de fechas importantes, es decir, que se ha creado una memoria en función de la forma de la materia, el espacio y el tiempo.



Figura 116. Niños, adultos y personas de disímiles procedencias disfrutaban el memorial.



APUNTES FINALES



APUNTES FINALES

Sun Tunnels, Utah USA.

APUNTES FINALES

Este libro analiza y vincula dos campos importantes encargados del estudio del movimiento del Sol en la bóveda celeste. El primero es el astronómico, con todas las teorías que describen el recorrido solar y las ecuaciones para determinar su posición. El segundo campo es el que se encarga de estudiar el Sol con el fin de aplicarlo en la arquitectura, ejemplo, cómo usarlo con fines simbólicos en la composición formal del diseño arquitectónico, o simplemente, como estudiar el posicionamiento del Sol para aplicar correctamente en el análisis del asoleamiento para las edificaciones o en el urbanismo.

Hasta la fecha, los textos existentes sobre cómo utilizar la iluminación solar en la arquitectura, estaban limitados a explicar el recorrido sin tener en cuenta el uso para condiciones específicas y exactas, se restringen solo a brindar los recorridos del Sol para las latitudes notables, y en el mejor de los casos, para algunas ciudades importantes o vinculada a la ciudad del autor del texto. Así mismo, los textos con contenido astronómico no tienen previsto explicar cómo poder aplicar estas ecuaciones y el posicionamiento exacto en la arquitectura.

Este texto brinda el contenido necesario para aplicar correctamente los temas inherentes al Sol en la arquitectura y el urbanismo, y consideramos que será de gran ayuda para los profesionales del diseño arquitectónico y urbano, sobre todo para aquellos que pretenden

incluir en su diseño efectos solares, tanto de elevada complejidad, como de sutiles y elementales fines. También ayudará a comprender como interpretar correctamente el movimiento solar aparente, para aprovechar y evitar el asoleo según sean las intenciones. Se prevé acompañar al texto, en un futuro, de un blog que facilite todo el proceso de cálculo y, a su vez, comprender completamente la temática en todos los ámbitos, tanto en la academia como en el campo profesional.

Luego de haber analizado críticamente el contenido de este texto y teniendo en cuenta sus principales objetivos hemos llegado a las siguientes consideraciones:

El libro por los conceptos, contenidos compilados, gráficos, diagramas, ejemplos de cálculo e información general constituye un documento que permite acceder con agilidad a los datos necesarios para ser utilizado como herramienta de trabajo en el diseño arquitectónico.

Los ejemplos de cálculos descritos para determinar la posición de la sombra sobre el plano horizontal en diferentes localizaciones son lo suficientemente aclaratorios para emprender cálculos similares.

Además de la secuencia de cálculo el texto se complementará, en un futuro, con un software de libre acceso situado en un blog, capaz de resolver este problema, y otros que sirvan de ayuda para la arquitectura.

Las proyecciones y gráficos solares de las latitudes notables, así como su explicación, ayudan a comprender mejor la cinemática solar, así como poder interpretar estas proyecciones para cualquier latitud en que se requiera aplicar.

Existe un número mayor de arquitectos que, en la actualidad, aplican de manera relevante el Sol en sus proyectos arquitectónicos. Este texto pretende exponer una muestra que anime al lector a indagar más en este tipo de proyectos, y, tal vez, fomente una búsqueda de esta singular aplicación en diseños de obras arquitectónicas, contribuyendo a generalizar este amor por el Sol y su presencia en la arquitectura.

Bibliografía

Bibliografía

Alemany, A. (1986). *Climatología Iluminación y Acústica* (Vol. 1). Editorial Departamentos de ediciones ISPJAE.

AstroMía. (2022, January 12). *Día Diccionario de astronomía, letra D*. AstroMía. Com.

AstroPixels.com. (2018, February 20). *Solstices and Equinoxes: 2001 to 2100 Greenwich Time*. AstroPixels.Com. <http://www.astropixels.com/ephemeris/soleq2001.html>

Aveni, A. F., Milbrath, S., & Peraza, C. (2004). Chichen Itza's Legacy in the Astronomically Oriented Architecture of Mayapán. *The University of Chicago Press Journals*, 123–143.

Bakulin, P. I., Kononovich, E. V., & Moroz, V. I. (1986). *Curso de Astronomia General* (1ra Edición, Vol. 1). MIR.

Bárbaro, D., & Alás, D. (2005). *DIG-5*.

Bartolini, S., & Pierozzi, M. (2016). Astronomy and solar symbology in the basilica of San Miniato al Monte and in the baptistery of San Giovanni in Florence. *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 16(4 Special Issue), 473–480. <https://doi.org/10.5281/zenodo.220972>

Batlle Cardona, M. (2022). *Día en que la luz del Sol ilumina la puerta del Panteón*. Viajes National Geographic. https://viajes.nationalgeographic.com/es/lifestyle/natale-di-roma-dia-que-luz-sol-ilumina-puerta-panteon_18094#:~:text=El día en el que,dos minutos y cincuenta segundos.

Beckers, B., Masset, L., & Beckers, P. (2007). Una proyección sintética para el diseño arquitectónico con la luz del Sol. *8o Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, 1–9.

Benoit Beckers. (2006, January 1). *Interpretación geométrica de la luz del cielo en el proyecto de arquitectura*. [Http://Www.Heliodon.Net](http://www.Heliodon.Net).

betanit.com. (2021, October 15). *Heliodon Robotic and manual heliodons for education, design and research*. Betanit.Com. <https://www.betanit.com/heliodon/>

Borgeaud, P. (1995). El Correo de la UNESCO. El Sol, mitos Antiguos tecnologías nuevas. In Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (pp. 16–22).

Buis, A. (2011, March 14). *El terremoto de Japón puede haber acertado los días terrestres, movido el eje*. NASA. <https://www.nasa.gov/topics/earth/features/japanquake/earth20110314.html>

Carlson, J. B. (1999). Pilgrimage and the Equinox ‘Serpent of Light and Shadow’ Phenomenon at the Castillo, Chichén Itzá, Yucatán. *Archaeoastronomy: The Journal of Astronomy in Culture*, 136–152.

Castaldi, F. (2014, November 12). *Gli antichi erano a conoscenza della diversa durata delle stagioni? Se si, ciò non era in contrasto con il moto circolare e uniforme del Sole attorno alla Terra?* Vialattea.Net.

cercaliaint nexusgeografics. (2021). *cercaliaint.nexusgeografics.com*. <http://cercaliaint.nexusgeografics.com/pisos/index.html>

CHICHÉN ITZA. (n.d.). 2021-09-04. <https://www.chichenitza.com/es/calendario-maya>

CosmoEduca. (2021, January 14). *Relatividad Especial. Anexo 1: Velocidad de la Tierra*. CosmoEduca. [https://www.iac.es/cosmoeduca/relatividad/anexos/movimientos.htm#:~:text=Movimiento de traslación alrededor del,%2C76 km%2Fs\).](https://www.iac.es/cosmoeduca/relatividad/anexos/movimientos.htm#:~:text=Movimiento de traslación alrededor del,%2C76 km%2Fs).)

dateandtime.info. (2012). *Hora en Guayaquil, Ecuador*. Dateandtime.Info. <https://dateandtime.info/es/city.php?id=3657509>

De la Paz Pérez, G. (2012, August 1). Brise-soleil, recurso arquitectónico de control solar. Evolución y propuesta de diseño optimizado para Camagüey. *Arquitectura y Urbanismo Vol.33 No.2*. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-58982012000200007

Delgado Orellana, G. J., & Orellana Samaniego, M. L. (2015). *Estimación de la radiación solar global diaria en el cantón Cuenca mediante la aplicación del modelo Bristow & Campbell*. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA.

Enciclopedia Salvat. (1984). *Cosmos: Gran atlas Salvat El Universo. Vol.5*. Salvat Editores, S.A.

Enciclopedia Salvat. (1985). *Cosmos: Gran atlas Salvat La Tierra. Vol.1*. Salvat Editores, S.A.

Ezpeleta Arenaza, T., & Ruiz Larrea, I. (1997, February 1). *Intihuatana: piedra que captura el sol*. Zientzia.Eus. <https://zientzia.eus/artikuluak/intihuatana-eguzkia-harrapatzen-duen-harria/es/>

Fernandes, L. C., & GRala da Cunha, E. (2011, October 1). Ensino de geometría solar: proposta de heliodon alternativo. *VII ELACAC Encontro Latino Americano de Conforto No Ambiente Construido y XI ENCAC Encontro Nacional de Conforto No Ambiente Construido*. https://www.researchgate.net/publication/279179525_ENSINO_DE_GEOMETRIA_SOLAR_PROPOSTA_DE_HELIODON_ALTERNATIVO

Flores Soto, J. A. (2011, May 6). El uso consciente de la luz en arquitectura a través de varios espacios romanos. *Archivo Digital UPM*, 1–30. <http://geniomaligno.tcomunica.net/>

Franco García, A. (2016). *La ecuación del tiempo*. Dinámica Celeste. <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/celeste/tiempo/tiempo.html>

Franco, J. T. (2013, October 31). *Espejos gigantes reflejan el sol de invierno en la ciudad noruega de Rjukan*. Plataforma Arquitectura. <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-305625/espejos-gigantes-reflejan-el-sol-de-invierno-en-la-ciudad-noruega-de-rjukan>

García-Badell, J. J. (1983). *Cálculo de la energía solar*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias.

GeoEnciclopedia. (2020, October 4). *GeoEnciclopedia*. GeoEnciclopedia. <https://www.geoenciclopedia.com/la-via-lactea/>

Global Monitoring Laboratory. (2021, January 12). *NOAA Solar Calculator*. Earth System Research Laboratories. <https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/>

Gonzalo Besuievsky, B. B. G. P. (2018). Skyline-based geometric simplification for urban solar analysis, *Graphical Models. ScienceDirect*, 95, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.gmod.2017.06.002>.

Herrmann, D. B. (2020). Sobre la inclinación del Intihuatana de Machu Picchu. *Filosofía de La Educación En Astronomía. Conferencias y Ensayos Seleccionados 1995-2020*, 244.

HOLT SMITHSON FOUNDATION. (2021, October 10). *Sun Tunnels*. HOLT SMITHSON FOUNDATION. <https://holtsmithsonfoundation.org/sun-tunnels>

Howell, E. (2021, September 1). *¿Qué tan rápido se mueve la Tierra?* SPACE. Com. <https://www.space.com/33527-how-fast-is-earth-moving.html>

Ismael Francisco. (2014, June 12). *Atabeira, la diosa de los indios cubanos*. CUBADEBATE. <http://www.cubadebate.cu/fotorreportajes/2014/06/12/atabeira-la-diosa-de-los-indios-cubanos/>

Labrador Herrera, L. M. (2019, March 14). *Entre la física y el Sol un arquitecto*. Granma. <https://www.granma.cu/cuba/2019-03-14/entre-la-fisica-y-el-sol-un-arquitecto-14-03-2019-22-03-52>.

Lacomba, R., Ferreiro, H., Fuentes, V., García, J. R., Gutiérrez, S., Hernández, M., Martínez, R., & Olivares, N. (1991). *Manual de arquitectura solar* (1ra Edición, Vol. 1). Editorial Trillas S. A.

Leyva Guzmán, J. R., & Villacís Ormaza, M. (2022). Uso y aplicación de la iluminación solar simbólica en la arquitectura maya e inca: una revisión literaria. In S. Springer (Ed.), *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 201, pp. 555–563). Actas de 2021 4th International Conference on Civil Engineering and Architecture. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-16-6932-3_48

Marsh, A. (2021a, January 12). *sunpath3d.html*. Andrewmarsh.Com. <http://andrewmarsh.com/apps/staging/sunpath3d.html>.

Marsh, A. (2021b, October 8). *andrewmarsh.com*. <http://andrewmarsh.com/>

Marsh, A., & Stravoravdis, S. (2017, July). Towards Dynamic Real-Time Daylight Simulation. *Proceedings of the Passive and Low Energy Architecture Conference (PLEA2017) - Design to Thrive*.

Marsh, A., & Thoo, S. (2016). Tecnología de juegos y análisis del rendimiento de la construcción. *Cincuenta Años Después: Revisitando El Papel de La Ciencia de La Arquitectura En El Diseño y La Práctica: 50a Conferencia Internacional de La Asociación de Ciencias de La Arquitectura*.

McFadden, L.A., Weissman, P. R., & Torrence V., J. (2007). *Encyclopedia of the Solar System*. Academy Press.

Meeus, J. (1998). *Astronomical Algorithms* (2nd.ed., Vol. 1). Willmann-Bell, Inc.

Ministerio del Transporte, M. y A. U. (2020). *Anuario del Real Observatorio Astronómico 2021*. Instituto Gráfico Nacional.

mpembed. (2021, October 28). *Abu Simbel Temple*. Abu Simbel Temple. <https://mpembed.com/show/?m=sgMWWDvdKsV&mpu=497>

NASA en Español. (2021, September 22). *Comienza el Otoño en el Hemisferio Norte y la Primavera en el Hemisferio Sur!!!* NASA EN ESPAÑOL. <https://www.lanasa.net/noticias/nuestro-planeta/ya-es-otono-en-el-hemisferio-norte-y-primavera-en-el-hemisferio-sur>

Olgay, V. (2008). *Arquitectura y clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas* (1ra Edición). Gustavo Gili.

Ortiz García, E. (2012a). Los incas y el Sol: métodos de observación solar y calendario incaicos. *Revista Española de Antropología Americana*, 127–143.

Ortiz García, E. (2012b). Una aproximación a los estudios arqueoastronómicos en los Andes precolombinos. In *No* (Vol. 39).

Perez Orozco, A. (2015). *SIPCSOL: Sistema para Cálculos Solares en Cuba*. Universidad de las Ciencias Informáticas.

Perez Orozco, A., & Alás Verdecia, P. M. (2015). *SIPCSOL: Sistema para Cálculos Solares en Cuba* [Universidad de las Ciencias Informáticas]. <https://repositorio.uci.cu/jspui/handle/123456789/7284>

PerformativeDesign. (2019a, February 21). *Significant Days of the Year*. PerformativeDesign. <http://performativedesign.com/articles/2019/significant-dates/>

PerformativeDesign. (2019b, February 21). *Significant Latitudes*. PerformativeDesign. <http://performativedesign.com/articles/2019/significant-latitudes/>

Pianzola, N. (2014, October 7). *La verdadera influencia de la Luna sobre nosotros*. BBC News Mundo. https://www.bbc.com/mundo/noticias/2014/10/141002_ciencia_luna_verdadero_poder_eclipse_np

Rovira, M. (2010). *El Sol (No 22)*. EUDEBA. Chichén Itzá: una reevaluación. *Estudio de Cultura Maya XLI*.

Sánchez Nava, P. (2015). Orientaciones astronómicas en la arquitectura maya de las tierras bajas. *Instituto Nacional de Antropología e Historia*.

Shepperson, M. (2009). Planning for the sun: Urban forms as a Mesopotamian response to the sun. *World Archaeology*, 41(3), 363–378. <https://doi.org/10.1080/00438240903112229>

Šprajc, I., & Sánchez, P. (2013, March 1). Astronomía en la arquitectura de Chichén Itzá: una reevaluación. *Estudio de Cultura Maya XLI*.

Sun path chart program. (2016, December 2). University of Oregon Solar Radiation Monitoring Laboratory. <http://solardat.uoregon.edu/SunChartProgram.php>

UMFA Utah Museum of Fine Arts. (2021, October 18). *Sun Tunnels*. Sun Tunnels. <https://umfa.utah.edu/land-art/sun-tunnels>

UNESCO. (2021, September 27). *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization UNESCO*. <http://whc.unesco.org/en/list/88/>

Universidad, R. La. (2011). *Revista La Universidad*. Publicación de La Secretaría de Extensión de La Universidad Nacional de San Juan. <http://www.revista.unsj.edu.ar/revista55/heliodon.php>

Uribe, B. (2016). “*Punto Flotante: lenguaje del tiempo en el espacio urbano*.” Plataforma Arquitectura. <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/782392/punto-flotante>

Verdecia Cutiño, E. C. (2012). *Recomendaciones de acciones de intervención para la conservación de las plazas y parques del centro histórico de Las Tunas* [Tesis de Maestría]. Universidad de Camagüey.

Wachberger, M., & Wachberger, H. (1984). *Construir con el sol: utilización de la energía solar pasiva* (1ra Edición, Vol. 1). Gustavo Gili.

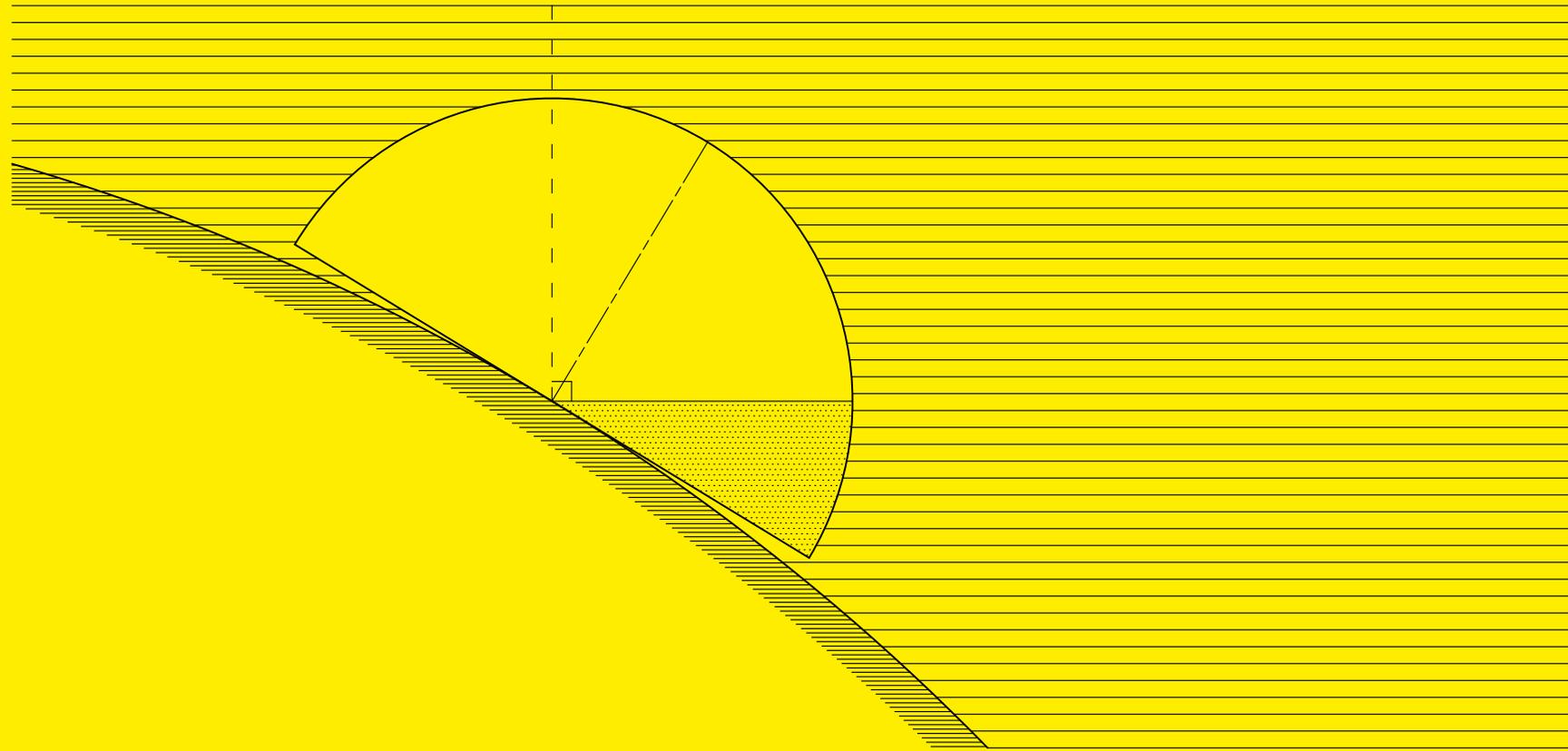
Wikipedia. (2012, February 1). *Energía solar*. Es.Wikipedia.Org. <https://es.wikipedia.org/w/index.php?oldid=53461490>

Wikipedia. (2021, November 12). *Segundo*. Es.Wikipedia.Org. <https://es.wikipedia.org/wiki/Segundo>

Wikipedia. (2022a, February 21). *Calendario romano*. Es.Wikipedia.Org. https://es.wikipedia.org/wiki/Calendario_romano

Wikipedia. (2022b, May 9). *Sol*. Es.Wikipedia.Org. <https://es.wikipedia.org/wiki/Sol>

Zumthor, P. (2019). *Atmósferas* (Vol. 1). Editorial GG, SLU.



ISBN 978-9942-821-83-6



9 789942 821836

 Universidad
Indoamérica