

ILUMINACION NATURAL
método de cálculo y conceptos fundamentales

arq. María C. Girardin

Editado Por Centro de Estudiantes de Arquitectura

I L U M I N A C I O N N A T U R A L
método de cálculo y conceptos fundamentales

Arq. María C. Girardin

Mi agradecimiento al arq. José Miguel Aroztegui por la lectura y comentario de esta publicación, y a la arq. Cristina Echevarría, a la arq. Adriana Gonga y al bach. Juan C. Silva por su colaboración en el diseño gráfico.

Marzo 1984.

INDICE

1.- Introducción

2.- Generalidades

- 2.1.- Factor de luz de día F_d .
- 2.2.- Valores de iluminación exterior E_e .
- 2.3.- Determinación de un nivel de E_e base para cálculos.
- 2.4.- Cantidad de iluminación necesaria.
- 2.5.- Determinación de períodos en que se obtiene la iluminación necesaria.

3.- Cálculo del factor de luz de día F_d

- 3.1.- Planteo General
- 3.2.- Tipo de cielo; el cielo de luminancia uniforme
- 3.3.- Consideraciones sobre las componentes del factor de luz de día F_d
- 3.4.- Cálculo de la componente de cielo CC .
Tablas estereográficas. Ejemplos
- 3.5.- Cálculo de la componente reflejada exterior CRE .
Tablas estereográficas. Ejemplos
- 3.6.- Cálculo de la componente reflejada interior CRI .
Gráficas. Ejemplos.
- 3.7.- El factor de luz de día: los coeficientes de corrección.
- 3.8.- Ejemplo de cálculo de F_d . Interpretación del resultado.

4.- Bibliografía

5.- Anexos

- Tablas estereográficas para cálculo de CC y CRE .
- Gráficas para cálculo de CRI .

1.- INTRODUCCION

El tema iluminación presenta dos aspectos igualmente importantes:

- la cantidad de luz a proveer en un local debe ser tal que las tareas que en él se realizan se cumplan con eficiencia y rapidez.
- la luz a proveer debe ser de una calidad tal que se cree un ambiente confortable, que ayudará también a obtener un buen rendimiento: deben evitarse contrastes excesivos, encandilamientos, debe lograrse un buen modelado y controlar las sombras arrojadas, considerar el color de la luz.

Durante muchos años el aspecto cuantitativo fue el único considerado. Surgió luego la arquitectura de las grandes superficies vidriadas; una consecuencia, fue encontrar que se alcanzaban los valores de iluminación requeridos aun en los puntos más comprometidos de un local, pero también se detectaron graves problemas de calidad, que llevaron a profundos estudios. Se llegó a dar más importancia a la calidad que a la cantidad. Hoy se considera que ambos aspectos son igualmente importantes, que tienen mucho en común y deben considerarse a la vez.

Otro enfoque del tema iluminación vino a aportar nuevas soluciones: la separación entre luz natural y luz artificial se fue haciendo menos rígida; la luz es una sola, aunque las fuentes sean diferentes. Problemas graves de calidad se solucionan en base a una iluminación artificial complementaria, que muchas veces disminuye a la vez otros problemas (térmicos, acústicos) causados por las grandes ventanas.

El avance tecnológico llevó también a plantear soluciones extremas: los edificios sin ventanas, rápidamente rechazados por sus usuarios. Quedó demostrado que la función de la ventana no es sólo iluminar; el hombre necesita la vinculación con el exterior, el "saber qué pasa", el experimentar la estimulante sensación que provoca la continua variación de la luz natural. Este hecho es tan indiscutible que algunos países consagran en sus códigos el "derecho a la luz".

Creemos que el arquitecto debe ir aún más allá de las consideraciones sobre cantidad y calidad y recordar que la luz es un recurso invaluable que la naturaleza ha puesto a su alcance para contribuir a la creación de la obra arquitectónica.

El objetivo de esta publicación es comenzar a darle métodos operativos que le permitan trabajar con la luz desde las etapas iniciales del proyecto.

Presenta un método de cálculo de iluminación natural desarrollado con la finalidad de dar una aproximación suficiente y rápida en su aplicación a Proyectos de arquitectura.

El factor de luz de día (Fd), base de cálculo en la iluminación natural, se halla como la suma de la componente de cielo (CC), la componente reflejada exterior (CRE) y la componente reflejada interior (CRI) y se aplican los coeficientes de corrección que tienen en cuenta la presencia del vidrio (τ_v), los elementos estructurales de la ventana (C_e) y el mantenimiento del vidrio (C_m). Resulta así:

$$Fd = (CC + CRE + CRI) * (\tau_v) * C_e * C_m$$

Al estudiar los factores que intervienen en el cálculo de Fd se analiza su incidencia en el valor de la iluminación en un punto y en la distribución de la luz en el local.

2.- GENERALIDADES

2.1.- Factor de luz de día Fd. La fuente de luz que se considera en iluminación natural es la bóveda celeste. El sol es, por supuesto, el origen de la luz natural; pero es sólo la parte de ésta que es difundida por la atmósfera la que se toma como fuente primaria de iluminación natural.

Hay dos motivos fundamentales para ello: no siempre se cuenta con luz directa de sol, por lo cual no es conveniente depender de ella en nuestros cálculos; además, las consideraciones sobre confort llevan generalmente a evitar la incidencia directa de ésta en locales en que se realizan tareas visuales (problema de brillos y encandilamiento). En países con gran disponibilidad de sol llega a admitirse el considerar en los cálculos la luz solar reflejada por las fachadas opuestas y el piso exterior del local estudiado.

La luminancia del cielo es variable a lo largo del día y por lo tanto es variable la iluminación que produce; se señala así una importante diferencia con la iluminación artificial, en que la fuente se mantiene constante. Esta variabilidad justifica el hecho de que la C.I.E. (Commission Internationale de l'Eclairage) haya definido el llamado "Factor de luz de día" (Fd) que permite hallar la iluminación en un punto de referencia, en función de la iluminación exterior que se tiene

en el mismo momento. Esta relación F_d es constante para cada punto; la variable es la iluminación exterior, por lo cual la iluminación interior varía continuamente. El factor de luz de día se expresa generalmente en porcentaje:

$$\text{Ec. 2.1.1.: } F_{dp} = \frac{E_p}{E_e} * 100$$

siendo: F_{dp} = factor de luz de día en el punto P (en porcentaje)
 E_p = iluminación en el punto P (en lx)
 E_e = iluminación producida por toda la bóveda celeste en un punto de un plano horizontal libre de obstrucciones (en lx)

Calculado F_{dp} y conocida E_e , se halla E_p .

$$\text{Ec. 2.1.2. } E_p = \frac{F_{dp} * E_e}{100}$$

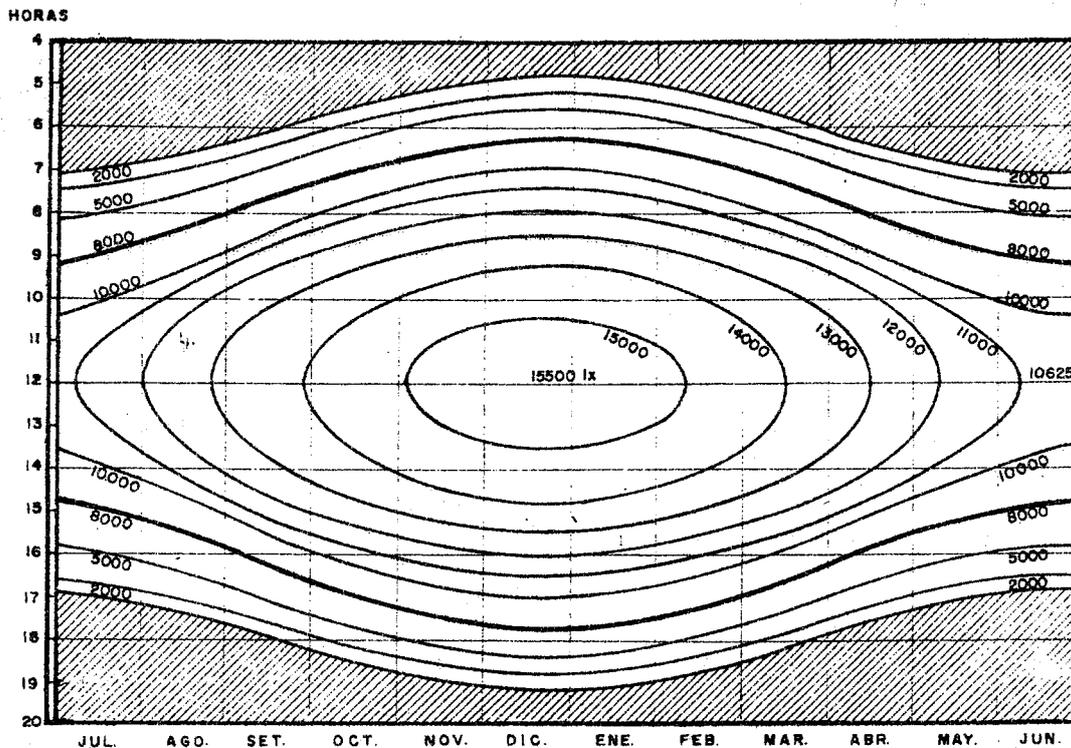
* Si el punto P pertenece a un plano horizontal y no tiene obstrucciones, $F_{dp} = 100\%$, ya que es iluminado por el total de la bóveda celeste.

* Si el punto P pertenece a un plano vertical y no tiene obstrucciones, $F_{dp} = 50\%$, al ser iluminado por la mitad de la bóveda celeste.

2.2.- Valores de iluminación exterior E_e . La gráfica 2.2 da valores de iluminación exterior E_e en función de fechas y horas, para Montevideo y para un cielo claro.

Está realizada según datos estadísticos y se prefirió no dar valores medios, sino cuál es la probabilidad de que los valores dados sean superados, lo cual constituye una base más rigurosa para los cálculos. La probabilidad de que E_e sea mayor que la expresada en la gráfica es:

- para diciembre, enero y febrero: 91.6 %
- para junio, julio y agosto : 73.0 %
- promedio anual : 83.7 %



GRAFICA 2.2 Los valores de iluminación están calculados en base a los datos de radiación difusa, según su rendimiento lumínico: 125 lm/W.

2.3.- Determinación de un valor base de E_e . Si bien usando los datos de esta gráfica se puede calcular E_p para distintas fechas y horas, se ha buscado, siguiendo el criterio adoptado en otros países, determinar un nivel de E_e que sirva como base para los cálculos de iluminación natural; por razones de economía (aprovechamiento de la luz natural) este nivel debe ser tal que sea superado durante la mayor parte de la jornada de trabajo; en nuestro país, en base a una jornada de trabajo comprendida entre las 8.00 hs y las 18.00 hs, se determina como nivel base: $E_e = 8000$ lx; considerando la curva correspondiente se tiene:

- en diciembre, enero y febrero: $E_e > 8000$ lx en el 95.9 % de la jornada de trabajo.
- en junio, julio y agosto : $E_e > 8000$ lx en el 73.1 % de la jornada de trabajo.
- en el año : $E_e > 8000$ lx en el 85.7 % de la jornada de trabajo.

2.4.- Cantidad de iluminación necesaria. Existen diversas tablas que dan valores de iluminación recomendados para realizar una tarea con buen rendimiento; es común encontrar diferencias apreciables entre ellas, que se explican por los diferentes criterios seguidos para formularlas.

Los puntos de partida pueden ser diferentes, por ejemplo:

* determinar la iluminación adecuada para evitar el esfuerzo visual, el deterioro no-natural de la vista, el riesgo de accidentes.

* determinar la iluminación adecuada para lograr el mayor rendimiento.

* determinar la iluminación adecuada para crear un ambiente lumínico agradable.

En todos estos aspectos influyen las diferencias entre los sujetos con que se experimenta, las consideraciones sobre qué es un mayor rendimiento, incluso las mayores exigencias que producen la elevación del nivel de vida de una sociedad.

La tabla 2.4 da valores recomendados para diferentes tipos de tarea. Estos valores son una referencia aproximada; en caso de tareas de gran exigencia debe realizarse un análisis más preciso.

L O C A L		E(lx)
Vivienda	dormitorio	50
	estar	100
	baño	100
	cocina	200
Escuela	circulación	200
	aulas - general	300
	" - pizarrón	400
	laboratorio - mesa	400
	dibujo, manualidad	600
	sala de lectura	400-600
Oficinas y Comercios	máquina escribir	400
	trabajo de oficina	400
	mostradores	400
	computadoras	600
	tareas de dibujo	600
Fábricas (área de trabajo)	de poca precisión	200
	de precisión media	400
	de precisión	900
	de gran precisión	2000

2.5.- Determinación de períodos en que se obtiene la iluminación necesaria. Conocido Fd en un punto, se puede determinar aplicando la ecuación 2.1.2 y la gráfica 2.2 en qué momentos se alcanza o se supera la iluminación requerida por la tabla 2.4.

EJEMPLO:

Local: fábrica en que se realizan trabajos de poca precisión; según tabla 2.4, $E_{necesario} = 200$ lx.
Analizado el local, se determina el punto más comprometido (M) y se halla F_{dm} .

a) Suponiendo $F_{dm} = 2.8 \%$, resulta, para $E_e = 8000$ lx,

$$E_M = \frac{2.8 * 8000}{100} = 224 \text{ lx}$$

Este resultado significa que la iluminación en el punto M será igual o superior a 224 lx (y por lo tanto, superior al valor recomendado por la tabla) en el 85.7 % de las horas correspondientes a la jornada de trabajo, considerando el promedio anual.

Si se quiere conocer E_M en un momento determinado, por ejemplo el 15 de diciembre a las 16 hs., se tendrá en la gráfica 2.2: $E_e = 12000$ lx, lo cual significa una probabilidad del 91.6 % o más de que E_e sea mayor que 12000 lx. Por lo tanto, con la misma probabilidad:

$$E_M \geq \frac{2.8 * 12000}{100}, \text{ o sea, } E_M \geq 336 \text{ lx}$$

b) Suponiendo: $F_{dm} = 1.85 \%$, resulta para $E_e = 8000$ lx,

$$E_M = \frac{1.85 * 8000}{100} = 148 \text{ lx}$$

Este resultado significa que en el punto M no se tendrá la iluminación necesaria en el 85.7 % de las horas correspondientes a la jornada de trabajo, sino en un período menor. Para que la iluminación en M alcance los 200 lx requeridos, la iluminación exterior deberá ser: (ver ecuación 2.1.2)

$$E_e \geq \frac{E_M * 100}{F_{dm}} = \frac{200 * 100}{1.85}, \text{ o sea, } E_e \geq 10810 \text{ lx}$$

Recurriendo a la gráfica 2.2, trazando la curva correspondiente a 10810 lx, puede determinarse en qué períodos

del año la iluminación natural en M será suficiente para desarrollar correctamente la tarea a realizar y en qué periodos deberá complementarse con iluminación artificial. Realizando este estudio para un local, puede decidirse la conveniencia de aumentar el área vidriada o determinarse zonas en que se agregue iluminación artificial no permanente, de encendido independiente.

3.- CALCULO DEL FACTOR DE LUZ DE DIA Fd

3.1.- Planteo General. El método que se expone en esta publicación divide el cálculo de Fd en tres etapas, que consideran cómo llega la luz al punto de referencia:

- * si llega directamente desde el cielo visto.
- * si llega luego de haberse reflejado en superficies exteriores.
- * si llega luego de haberse reflejado e interreflejado en superficies interiores.

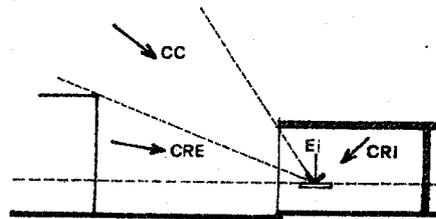


FIGURA 3.1

En todos los casos, se supone que las superficies se comportan como difusores perfectos, es decir, que su luminancia es igual en todas direcciones.

Se tienen así tres componentes que integran el factor de luz de día:

- * CC - Componente de cielo: mide la iluminación que llega al punto directamente desde el cielo visto a través de la ventana. (1)
- * CRE - Componente reflejada exterior: mide la iluminación que llega al punto después de haberse reflejado en superficies exteriores vistas a través de la ventana.
- * CRI - Componente reflejada interior: mide la iluminación que llega al punto después de haberse reflejado e interreflejado en superficies interiores del local.

(1) Llamamos "ventana" al vano con o sin vidrio que ilumina el punto en estudio, que puede pertenecer a un espacio interior o exterior.

Los métodos de cálculo en que se halla F_d en tres etapas son los primeros que se desarrollaron; hay también métodos en que F_d se calcula en una sola etapa, sin hacer distinciones sobre cómo llega la luz al punto de referencia. Los métodos de cálculo en etapas tienen la ventaja sobre éstos de que se sabe inmediatamente si llega o no luz directamente desde el cielo y, en ese caso, cuánto se depende del valor de CRE y especialmente de CRI. Como estos valores dependen de la reflexión de la luz, es necesario aumentar todo lo posible la reflectancia de las superficies exteriores (si es posible) e interiores, sobre las que el arquitecto puede actuar. También la distinta relación entre los valores de CC y CRE y el valor de CRI produce diferentes efectos visuales; el arquitecto debe hacer uso del hecho de que la luz que llega directamente produce un modelado más definido, destaca sombras, mientras que la luz reflejada suaviza diferencias y combinarlas a fin de lograr el efecto deseado.

3.2.- Tipo de cielo: el cielo de luminancia uniforme. El valor de todas las componentes de F_d depende de la distribución de luminancias en el cielo de la localidad en que se trabaja.

La CIE ha tipificado algunos tipos de cielo, entre ellos el "cielo de luminancia uniforme" (CLU) que es el que se ha adoptado en nuestro país; es un cielo claro, sin nubes, en que todas las áreas tienen igual luminancia. Los valores dados por la gráfica 2.2 corresponden aproximadamente a este cielo. En general el cielo de luminancia uniforme se adopta en climas donde la gran variedad de situaciones hace prácticamente imposible fijar una distribución de luminancias como base de cálculo. La iluminación E_e que este cielo produce en un punto de un plano horizontal libre de obstáculos está dada por la expresión: $E_e = \pi \cdot L_c$, siendo L_c la luminancia del cielo.

Al trabajar en base a CLU no se hace distinción en cuanto a las distintas orientaciones. En estudios hechos en Inglaterra se ha encontrado que las orientaciones Sur (Norte para nuestro hemisferio) tienen mayor luminancia que las opuestas. El hecho de que en las orientaciones Norte hay que usar generalmente dispositivos de control de entrada de radiación solar (ya sea por problemas térmicos o de calidad de iluminación) que en los hechos reducen el factor de día calculado, hace que se justifique reducir la luminancia de los sectores Norte, llegando a igualar los cálculos con los del Sur.

3.3.- Consideraciones sobre los componentes del factor de luz de día. Las componentes del cielo y reflejada exterior pueden calcularse punto a punto en un local y en diversos planos, mediante fórmulas matemáticas y logrando la precisión deseada. Sus valores dependen, en el caso del cielo de luminancia uniforme, del ángulo sólido bajo el cual el punto de referencia ve la superficie iluminante (cielo, obstrucción

exterior) y del ángulo de incidencia que forman los rayos que llegan de éstas con el plano al que pertenece el punto, o sea, de la posición relativa entre superficie iluminante y plano de referencia.

La incidencia de estos dos factores explica algunos hechos, en general conocidos:

- * la importancia del tamaño de las ventanas.
- * la reducción de la iluminación en el punto de referencia, al alejarse de la ventana.
- * las ventanas altas dan una iluminación más pareja que las ventanas bajas de iguales dimensiones.
- * una misma área de vidrio distribuida de diferentes maneras produce efectos muy distintos en cuanto a la repartición de la luz.
- * los aleros producen una mejor distribución de la luz.
- * un mismo punto recibe distinta iluminación según el plano a que pertenece.

En el caso de la componente reflejada interior el cálculo es más complejo al producirse interreflexiones entre las superficies iluminantes; puede trabajarse en base a conceptos sobre intercambio de radiación, que dan origen a métodos muy laboriosos o recurrir a métodos simplificados y tal es el objetivo de esta publicación.

Se ha optado por trabajar en base a un método simplificado desarrollado en Inglaterra que, verificado en la práctica ha dado resultados muy satisfactorios. Se recuerda que en último término el receptor de la luz es el ojo, que no es sensible a variaciones pequeñas de iluminación.

Debido a su origen, la componente reflejada interior no presenta variaciones tan importantes como CC y CRE aunque también va disminuyendo al alejarse el punto de la ventana. Por lo tanto se determinan solamente dos valores por local: el valor medio (CRI_{medio}) que se aplica en todos los puntos que distan de la ventana menos de los dos tercios de la profundidad del local y el valor mínimo ($CRI_{mínimo}$) que se aplica en el tercio restante.

Los valores de CRI dependen de la cantidad de luz que entra al local a través de la ventana (la cual a su vez depende del cielo y de las obstrucciones exteriores), del volumen del local en el cual este flujo lumínico se reparte y de la reflectancia, o sea del color, de las superficies interiores en las cuales la luz se interrefleja, determinándose así cuánta luz es absorbida por las paredes y

cuánta luz contribuye a la iluminación del ambiente. El color del piso es de gran importancia ya que es el que refleja por primera vez la luz proveniente del cielo, que es en general la fracción mayor de la luz que entra al local. Nótese que en un local con grandes superficies vidriadas el valor de CRI puede llegar a disminuir al ser muy bajo el coeficiente de reflexión de los vidrios.

Debido a la poca variación de sus valores, el efecto de la componente reflejada interior es atenuar las diferencias que se producen en los valores de CC y CRE al alejarse de la ventana. Contribuye así a lograr una mejor repartición de la luz y suaviza el modelado y las sombras.

En casos en que el valor de CC es muy bajo o nulo (puntos desde los cuales no se ve el cielo), se hace fundamental aumentar el valor de CRE, sobre el que a veces es imposible actuar y el de CRI, sobre el que sí puede actuar el arquitecto. (ver punto 3.1)

Se dan aquí una serie de ejemplos extraídos de diversas publicaciones en que se grafican observaciones hechas anteriormente; se recurre en ellos a dos formas típicas de representar la distribución de la luz en un local:

- corte del local, en que se representan los valores de F_d (a veces en escala logarítmica) desde la ventana a la pared opuesta.

- planta del local en que se trazan curvas isolux, es decir, curvas que unen puntos de igual F_d .

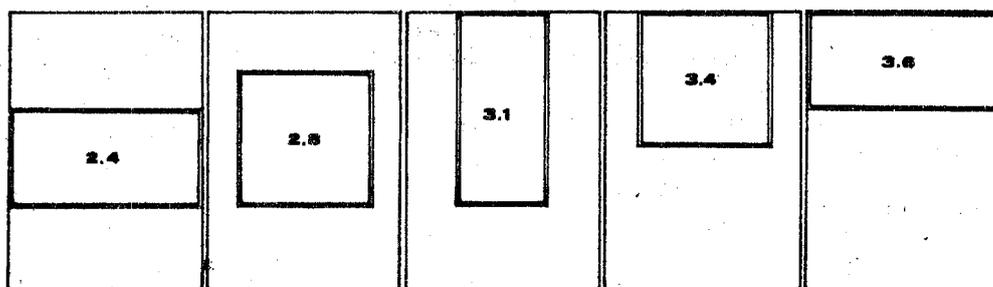


FIGURA 3.3.1

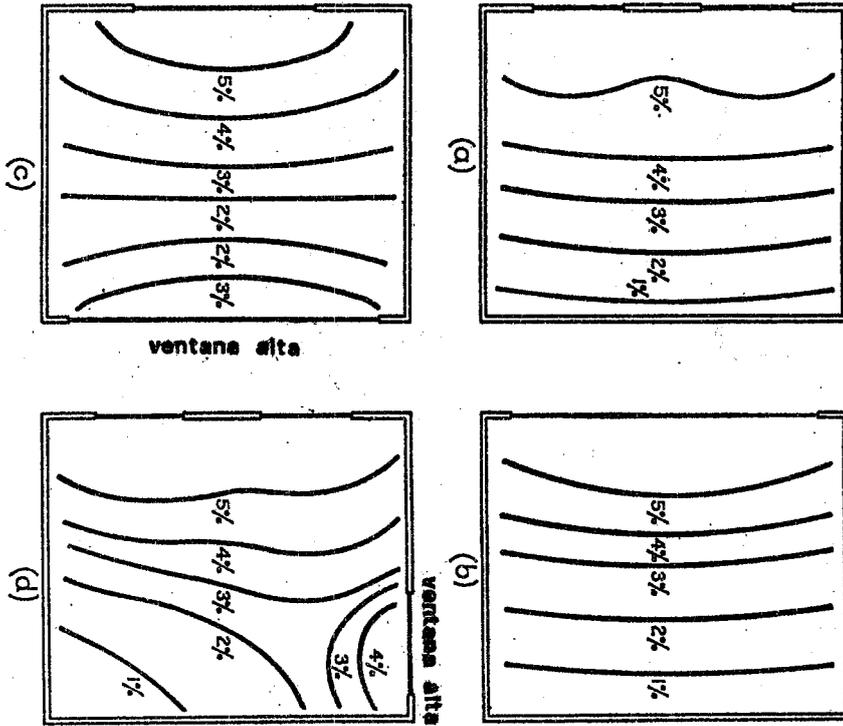
Influencia de la forma y ubicación de la ventana (de igual área) en una misma pared. Se dan valores de F_d a 50 cm de la pared opuesta a la ventana

FIGURA 3.3.2

* Curvas isolux

* El área vidriada es la misma en los 4 casos

- a) ventana vertical
- b) ventana horizontal
- c) ventana en dos lados opuestos
- d) ventana en dos lados adyacentes



Diferente distribución de la iluminación.

Mayores valores de Fd cerca de la pared opuesta a la ventana en el caso a (ventanas verticales) que en el caso b (ventanas horizontales)

FIGURA 3.3.3

Efecto de CRI: mejor distribución de la luz.

Curva B - CC: relación entre valores extremos:

$$\frac{9.95}{1.06} = 9.39$$

Curva A - Fd: la relación entre valores extremos disminuye:

$$\frac{13.10}{2.75} = 4.76$$

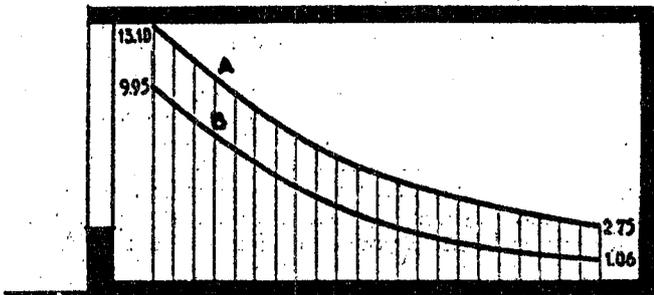


FIGURA 3.3.4

Efecto de un alero: mejor distribución de la luz.

Curva A - Fd en local sin alero: relación entre valores extremos:

$$\frac{13.10}{2.75} = 4.76$$

Curva C - Fd en local con alero: la relación entre valores extremos disminuye:

$$\frac{8.90}{2.25} = 3.96$$

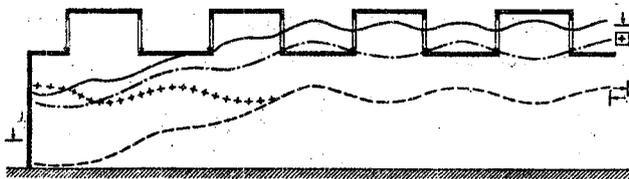
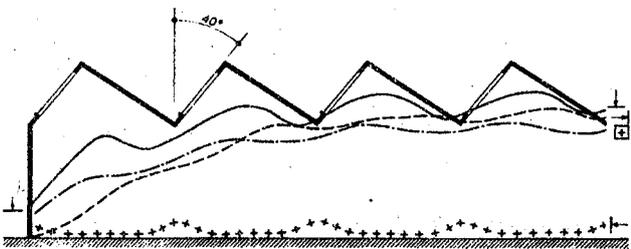
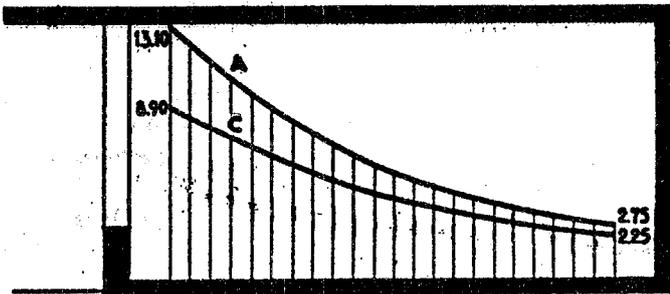


FIGURA 3.3.5

Iluminación cenital: Fd en plano horizontal ↓ ————
 Fd en plano vertical → | - - - - -
 Fd en plano vertical ← | + + + + +
 Fd en plano vertical ⊕ | - . - . - . -

3.4.- Cálculo de la componente de cielo CC. El valor de CC se calcula mediante las tablas estereográficas que se han desarrollado para este trabajo (ver bibliografía, No. 3) y que se dan en los Anexos.

El método usado en la elaboración de estas tablas consiste en dividir la bóveda celeste en zonas definidas por verticales y horizontales que varían de 10° en 10° ; la componente de cielo producida por estas áreas en un punto puede hallarse en función de los ángulos bajo los cuales esta zona de cielo es vista desde el punto y del plano al cual pertenece el punto. Estas áreas son dibujadas en proyección estereográfica y se da sobre cada una de ellas el valor de la componente de cielo que producen; se obtienen así las tablas estereográfica. Se eligió trabajar con la proyección estereográfica por ser el método utilizado para estudiar asoleamiento en un punto y radiación solar recibida en el mismo. Si sobre estas tablas se lleva la proyección estereográfica del área de cielo vista desde el punto teniendo en cuenta el plano al que éste pertenece y si la ventana es vertical u horizontal se obtiene el valor de CC sumando los valores de todas las pequeñas áreas de cielo vistas. Estos valores han sido expresados como enteros por comodidad; deben dividirse entre 100 para que queden expresados en porcentaje. Estas tablas pueden superponerse a fotos obtenidas con el globoscopio instrumento desarrollado por Pleijel en Suecia, que permite obtener fotos que son la proyección estereográfica de un espacio mediante el uso de espejos parabólicos.

Por definición de componente de cielo, el área de ventana que se tiene en cuenta es la que queda arriba del plano horizontal que pasa por el punto de referencia; en ningún caso el área de ventana bajo el plano horizontal aumenta el valor de CC.

Debido a las fórmulas utilizadas para construir las tablas, la normal a la ventana debe coincidir con la dirección indicada en la tabla.

Las tablas han sido diseñadas para ventanas sin vidrio; la presencia de éste se considerará posteriormente.

El total de los valores parciales dados en las tablas 1 y 3 es igual a 50 % por corresponder al caso en que desde el punto se ve media bóveda celeste; en la tabla 2 el total es 50% ya que se considera la posibilidad de dos superficies iluminantes; en la tabla 4 el total es 100 % ya que puede verse toda la bóveda celeste.

Las tablas permiten obtener la precisión que se desee en la determinación de CC, realizando una correcta interpolación.

El valor de CC, así como el de CRE, se determina para un punto de referencia, que pertenece a un determinado plano (ver punto 3.3), de altura variable según el caso. Es común trabajar con un plano horizontal, pero hay casos en que el plano puede ser vertical (pizarrón, pared de un museo) o inclinado (máquina, mesa de dibujo).

Las tablas incluidas en los Anexos de este trabajo consideran los siguientes casos:

* Ventana vertical: - punto en un plano horizontal (Tabla 1)
- punto en un plano vertical perpendicular a la ventana (Tabla 2)
- punto en un plano paralelo a la ventana (Tabla 3)

* Ventana horizontal: - punto en un plano horizontal (Tabla 4)

El hecho de que se calcule en base a un cielo de luminancia uniforme permite resolver otros casos ya que si la situación no está contemplada en las tablas pueden hacerse giros del conjunto hasta ubicarnos en uno de los casos considerados. (Ver punto 3.4.3)

EJEMPLOS

3.4.1.- Hallar CC en el punto P perteneciente al plano horizontal.

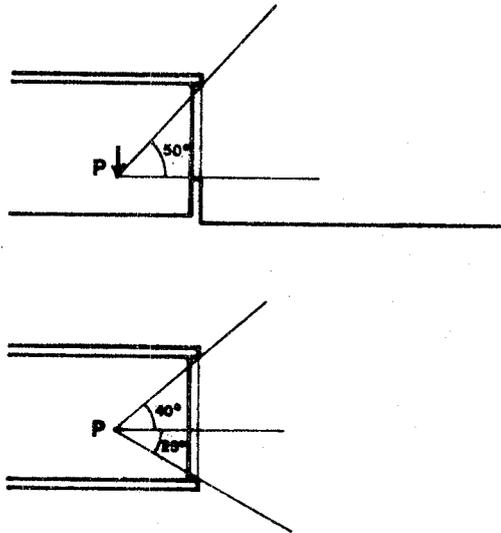


FIGURA 3.4.1.1

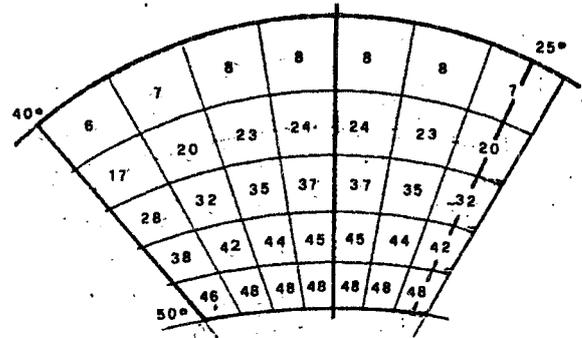


FIGURA 3.4.1.2

Se realiza la proyección estereográfica desde P, viendo la ventana y el cielo y se lleva sobre la Tabla 1, tomando la precaución de ubicar la normal a la ventana según se indica.

La suma de los valores comprendidos en la zona delimitada por la ventana, o sea, es este caso, la zona de cielo vista desde el punto, nos permite hallar CC.

$$\begin{aligned} \Sigma &= 6 + 7 + 8*4 + 7*0.5 + \\ &+ 17 + 20 + (23+24)*2 + 20*0.5 + \\ &+ 28 + 32 + (35 + 37)*2 + 32*0.5 + \\ &+ 38 + 42 + 44*2 + 45*2 + 42*0.5 + \\ &+ 46 + 48*5 + 48*0.5 = 998,5 \end{aligned}$$

$$CC_p = \frac{998.5}{100} = 10.0 \%$$

Se realiza la proyección estereográfica de las tres ventanas desde el punto P.

- CC ventana 1:

Superponiendo la proyección estereográfica a la tabla 1 se obtiene el valor de CC correspondiente. Como las líneas que la definen no corresponden a las divisiones de la tabla, se toman partes aproximadas de los valores correspondientes:

7	→	3	$\Sigma = 103$
20	→	8	
32	→	8	
8	→	5	
24	→	16	
37	→	16	
35	→	23	
37	→	24	

A esta suma se le agregan los valores enteros:

$$103 + 8 + 8 + 23 + 24 = 166$$

$$CC_{vent1} = \frac{166}{100} = 1.66 \%$$

- CC ventana 2:

Se utiliza también la Tabla 1, pero girando la proyección estereográfica de modo de llevar la normal a la ventana 2 a la posición indicada. Se tiene:

$$\Sigma = (8 + 24 + 37) * 2 + 8 + 23 + 35 = 204$$

$$CC_{vent2} = \frac{204}{100} = 2.04 \%$$

- CC ventana 3:

Superponiendo la proyección estereográfica a la Tabla 4 se obtienen los valores correspondientes a la iluminación cenital.

$$\begin{aligned} \Sigma &= (60 + 63 + 65 + 70 + 76 + 78 + 76 + 85 + 89 + 79 + 89 + \\ &+ 95) * 4 + (55 + 46 + 60 + 48 + 63 + 48 + 65 + 48) * 2 = \\ &= 4566 \end{aligned}$$

$$CC_{vent3} = \frac{4566}{100} = 45.66 \%$$

Se destaca el alto valor de CC correspondiente a la iluminación cenital.

- CC total sobre el punto P:

$$CC_{total} = CC_{vent1} + CC_{vent2} + CC_{vent3}$$

$$CC_{total} = 1.66 + 2.04 + 45.66 = 49.36 \%$$

3.4.3.- Hallar la CC producida por la iluminación cenital en un plano vertical que pasa por P, en el ejemplo de la figura 3.4.2.1.

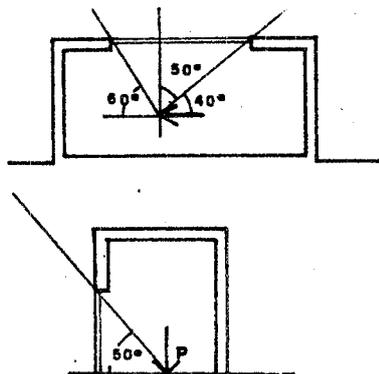


FIGURA 3.4.3

Dado que el cielo considerado es de iluminación uniforme se puede efectuar un giro de todo el sistema de modo de poder trabajar como si la ventana fuera vertical y usar la Tabla 1 (fig. 3.4.3)

3.5.- Cálculo de la componente reflejada exterior CRE. Las tablas estereográficas permiten también calcular el valor de CRE. Si las obstrucciones vistas desde el punto en estudio tuvieran la misma luminancia que el cielo, se podría realizar su proyección estereográfica y llevarla sobre la tabla correspondiente leyendo así su valor; pero la luminancia de las obstrucciones es menor que la del cielo por provenir solamente de la luz reflejada, si se hace:

$$\frac{\text{luminancia obstrucción}}{\text{luminancia cielo}} = n$$

se pueden usar los valores de las tablas estereográficas, reduciéndolos al multiplicarlos por este coeficiente n.

Es común tomar la relación $n = 0.10$; esta corresponde al caso en que la obstrucción es un plano vertical que ve media bóveda celeste y cuya reflectancia es 0.20, por lo cual se tiene:

$$n = \frac{L_{\text{obst}}}{L_{\text{cielo}}} = 0.50 * 0.20 = 0.10$$

EJEMPLOS

3.5.1.- Hallar CC y CRE en el punto P perteneciente a un plano horizontal, en el local de la figura 3.5.1.1

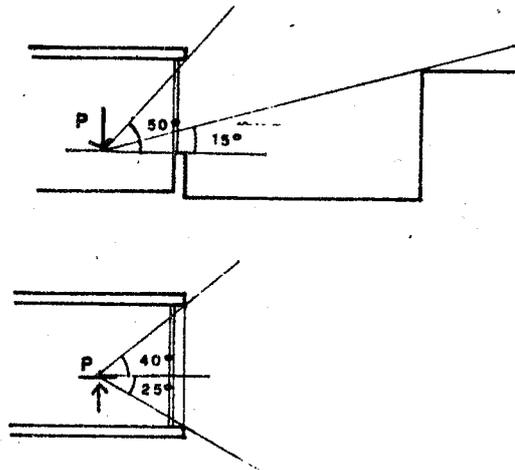


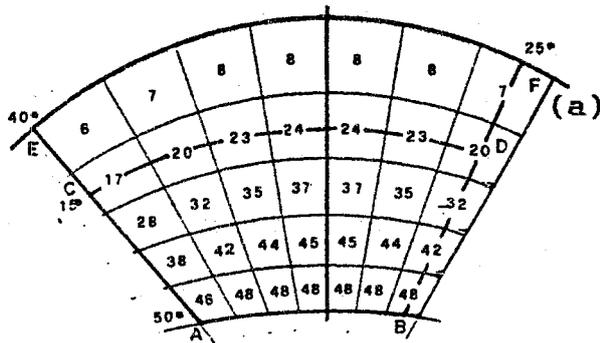
FIGURA 3.5.1.1

Se realiza la proyección estereográfica desde P, viendo la ventana, el cielo y la obstrucción y se lleva sobre la Tabla 1, tomando la precaución de ubicar la normal a la ventana según se indica en la fig. 3.5.1.2 (a):

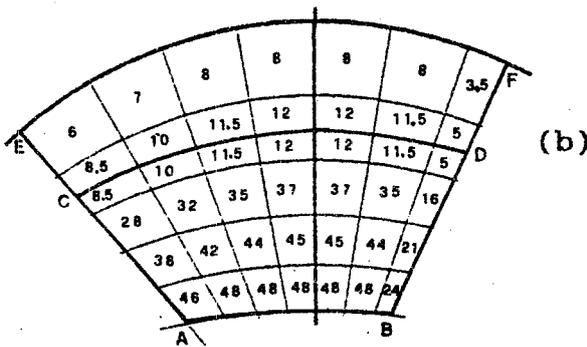
La suma de los valores comprendidos en la zona delimitada por ABCD de la figura 3.5.1.2 (b) permite hallar CC:

$$\begin{aligned} \Sigma = & [(17 + 20 + (23 + 24)*2)] / 2 + 20 / 4 + \\ & + 28 + 32 + (35 + 37)*2 + 32 / 2 + \\ & + 38 + 42 + (44 + 45)*2 + 42 / 2 + \\ & + 46 + 48 * 5 + 48 / 2 = 879.5 \end{aligned}$$

$$CC = \frac{879}{100} = 8.79 \%$$



Análogamente en base al área CDEF definida por la proyección de la obstrucción se halla CRE. La misma está definida por una horizontal a 15° y una vertical a 25° como se indica en la figura 3.5.1.2 (a). La suma de los valores indicados en la figura 3.5.1.2 (b) permite hallar CRE:



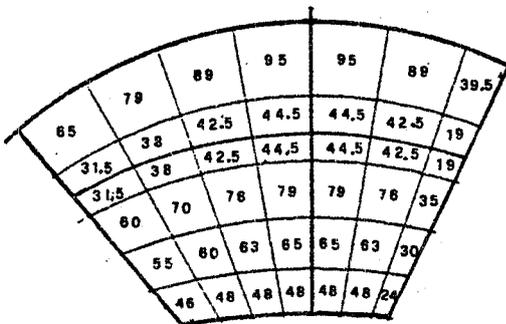
$$\Sigma = 6 + 7 + 8 * 4 + 3.5 + 8.5 + 10 + (11.5 + 12) * 2 + 5 = 119$$

Como se había visto en el punto 3.5, suponemos que la luminancia de la obstrucción es la décima parte de la luminancia del cielo. Se tiene así:

$$CRE = \frac{119}{100} * \frac{1}{10} = 0.12 \%$$

FIGURA 3.5.1.2

3.5.2.-Hallar CC y CRE en el punto P del local de la figura 3.5.1.1 ubicado en un plano paralelo a la ventana.



Llevando la misma proyección estereográfica a la Tabla 3 (fig. 3.5.2), se obtienen los valores que permiten calcular CC y CRE:

$$CC = \frac{1448.5}{100} = 14.48 \%$$

$$CRE = \frac{814}{100} * \frac{1}{10} = 0.81 \%$$

FIGURA 3.5.2

3.5.3.- Hallar CC y CRE en le punto P del local de la figura 3.5.1.1, ubicado en un plano vertical perpendicular a la ventana, del lado indicado en planta.

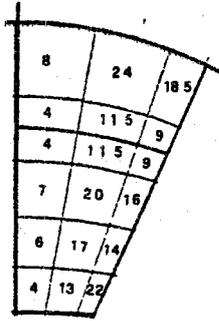


FIGURA 3.5.3

Se superpone la misma proyección estereográfica en la Tabla 2 del lado indicado (fig. 3.5.3)

$$CC = \frac{132.5}{100} = 1.33 \%$$

$$CRE = \frac{75}{100} * \frac{1}{10} = 0.07 \%$$

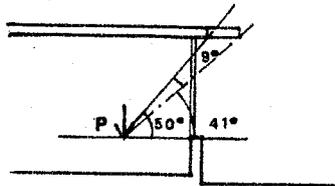
3.5.4.- Se desea agregar al local de la figura 3.5.1.1 un alero de longitud indefinida, tal que la componente de cielo no sea inferior al 6% en el punto P ubicado en el plano horizontal.

En el ejemplo 3.5.1 se tenía:

$$CC = 8.79 \%$$

Se puede quitar con el alero hasta:

$$8.79 - 6 = 2.79 \%$$



Probando con un alero que forma 40° con la horizontal, es decir que cubre la zona entre 40° y 50° se eliminarían los valores indicados en la figura 3.5.4.2 cuya sumatoria es 310. Se restaría un valor 3.10 % que es mayor que 2.79 %, o sea que el alero sería excesivo. Si 3.10 % corresponde a un ángulo de 10°, se puede calcular el ángulo que permite obtener la componente de cielo pedida:

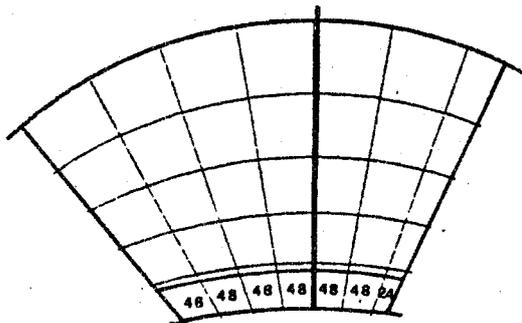


FIGURA 3.5.4.2

$$\begin{aligned} 3.10 \% & \text{ --- } 10^\circ \\ 2.79 \% & \text{ --- } x \end{aligned}$$

$$x = 9^\circ$$

Esto significa que el alero puede cubrir 9° , es decir, verse a 41° desde el punto P (fig. 3.5.4.1)

3.6.- Cálculo de la componente reflejada interior CRI. En el punto 3.3 se estableció que, por el hecho de originarse en interreflexiones el valor de CRI sufre pocas variaciones dentro de un local, por lo cual es costumbre calcular un valor medio, aplicable en la zona comprendida entre la ventana hasta los dos tercios de profundidad del local, y un valor mínimo que se aplica en el tercio del local próximo a la pared posterior.

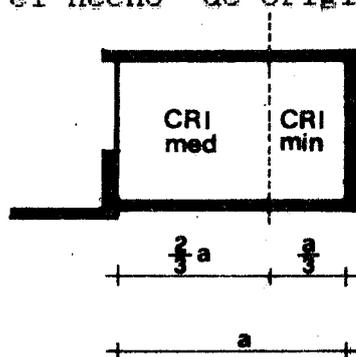


FIGURA 3.6.1

El valor de CRI medio y mínimo se calcula mediante las gráficas desarrolladas para este trabajo que se dan en los Anexos.

La fórmula en que se basan estas gráficas tiene su origen en Inglaterra (ver punto 3.3); parte de calcular la iluminación que se produce en el interior de una esfera hueca, al interreflejarse en sus paredes la luz que penetra a través de una abertura; la iluminación resultante es función del flujo luminoso que penetra a la esfera, del área de ésta y de la reflectancia ante la radiación luminosa de su pared interior. La expresión base fue extendida a locales de dimensiones corrientes, considerando obstrucciones exteriores que se dan generalmente en la práctica; verificada en casos reales, dio resultados muy satisfactorios; muchas veces su uso puede extenderse a situaciones atípicas, haciendo suposiciones que hacen posible aplicarla.

En el caso de locales con más de una ventana en la misma pared pueden sumarse las áreas de las ventanas y trabajar como si fuera una sola. En el caso de locales con ventanas en dos paredes se trabajará con cada una de ellas por separado; si las ventanas están en paredes opuestas, la suma de los valores medios de CRI de cada una de ellas puede aplicarse en todo el local; si las ventanas están en paredes adyacentes se hallarán los valores medios y mínimos para cada una de ellas y se sumarán según corresponda a la ubicación del punto en estudio.

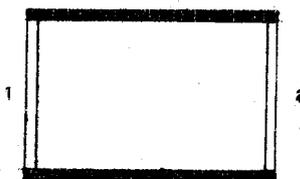


FIGURA 3.6.2

$$CRI = CRI_{med1} + CRI_{med2}$$

en todo el local

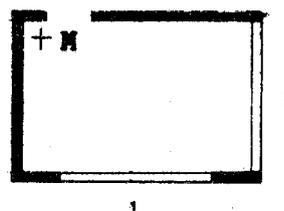


FIGURA 3.6.3

$$CRI_{min} = CRI_{min1} + CRI_{min2}$$

(en el punto M)

Para el diseño de las gráficas se establecieron determinadas proporciones entre las dimensiones del local, que permiten establecer la relación: sup.de la esfera/área abertura, en función de la relación: Área ventana/Área piso = A_v / A_{pi} , relación que se maneja comunmente por ordenanzas municipales.

Es importante destacar que en el caso de los valores de CRI interviene toda la superficie de ventana, a diferencia de lo que ocurre en el cálculo de CC en que sólo cuenta el área de ventana por encima del plano horizontal que pasa por el punto estudiado. Resulta entonces que aumentar el área de ventana bajo este plano, sólo se traduce en un aumento de CRI; el vidrio ubicado por encima del plano de trabajo da más rendimiento ya que aumenta todas las componentes; de todos modos, cuando hay razones de otro orden que llevan a tener vidrio bajo este plano (visión, por ejemplo) el valor de F_d será aumentado, fundamentalmente en la parte más alejada de la ventana, colaborando en la mejor repartición de la luz en el local.

Las gráficas consideran:

* relaciones A_v/A_{pi} que van de 0.05 a 0.50; en caso de superarse esta relación, pueden suponerse dos ventanas.

* reflectancia del techo $\rho_{te} = 0.70$, en caso de $\rho_{te} \neq 0.70$ se aplicarán coeficientes de corrección:

ρ_{te}	Coef. corrección
0.40	0.70
0.50	0.80
0.60	0.90
0.80	1.10

* reflectancia de piso: se toman dos valores : $\rho_{pi} = 0.15$ y $\rho_{pi} = 0.40$. En las gráficas queda en evidencia la importancia que un piso claro tiene en la iluminación reflejada, al ser el piso la superficie que refleja en primer término la radiación luminica recibida desde el cielo; no se han considerado valores de ρ_{pi} superiores a 0.40 ya que si bien el piso puede ser muy claro se le superponen objetos y personas que hacen que la reflectancia se reduzca.

* reflectancia de paredes: se toman tres valores: $\rho_{pa} = 0.25$, $\rho_{pa} = 0.50$ y $\rho_{pa} = 0.75$, pudiéndose interpolar entre ellos. También se aprecia en las gráficas la importancia del color de las paredes. Si la diferencia de colores entre las paredes del local estudiado origina grandes diferencias en el valor ρ_{pa} de cada una de ellas, puede calcularse un valor medio de ρ_{pa} , teniendo en cuenta cada reflectancia y la superficie A_1 , A_2 , ..., A_n a la que corresponde.

$$\rho_{pamedio} = \frac{\rho_{pa1} * A_1 + \rho_{pa2} * A_2 + \dots + \rho_{pan} * A_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n}$$

La Tabla 3.6 da valores aproximados de reflectancia ante la radiación luminica:

	ρ
vidrio común	0.15
vidrio esmerilado	0.12 a 0.15
vidrio opal	0.30 a 0.55
vidrio translúcido blanco	0.20 a 0.40
mármol blanco	0.30 a 0.70
papel blanco	0.60 a 0.90
seda blanca	0.60 a 0.70
sup. pintada de blanco	0.80
sup. pintada color arena	0.70
sup. pintada amarillo gamuza	0.64
sup. pintada gris claro	0.60
sup. pintada de rosado	0.54
sup. pintada azul cielo	0.37
sup. pintada verde oliva	0.21
fibrocemento	0.50
hormigón visto	0.35
ladrillo de prensa	0.30
parquet claro	0.30
parquet oscuro	0.12
gres rojo	0.20
baldosa negra	0.08
gramilla	0.06 a 0.10

El valor de CRI medio se lee en la gráfica correspondiente, entrando por la relación A_v/A_{pi} en abscisas, subiendo hasta la curva que corresponde según ρ_{pi} y ρ_{pa} ; el valor de CR_{medio} se lee en la ordenada correspondiente.

El valor de CRI mínimo se halla análogamente en la Gráfica B.

EJEMPLO

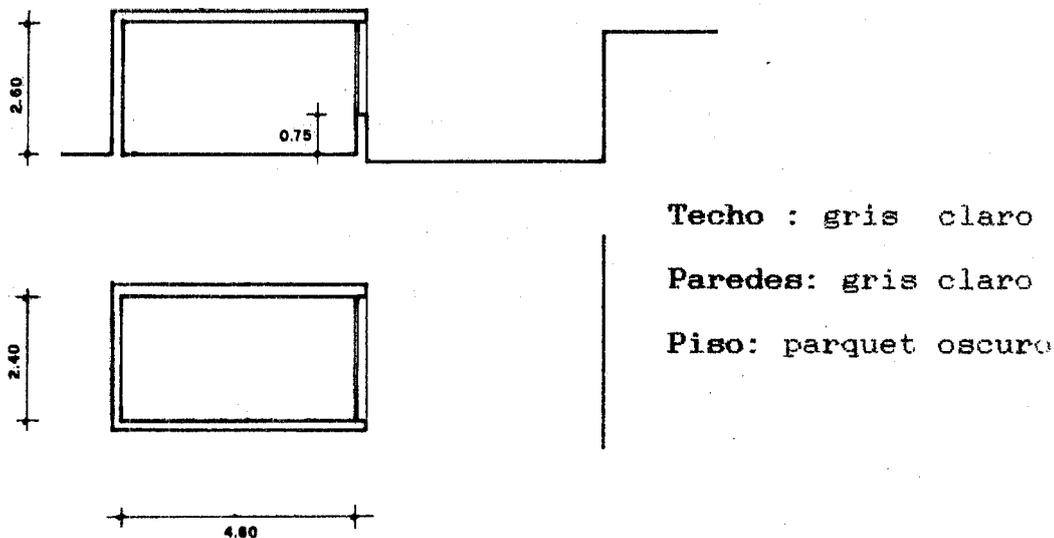


FIGURA 3.6.4

$$A_v = 1.85 * 2.40 = 4.44$$

$$A_{pi} = 4.60 * 2.40 = 11.04$$

$$\frac{A_v}{A_{pi}} = \frac{4.44}{11.04} = 0.40$$

Según Tabla 4.6: $\rho_{te} = 0.60$
 $\rho_{pa} = 0.60$
 $\rho_{pi} = 0.12$ (se toma $\rho_{pi} = 0.15$)

En Gráfica de CR_{medio} , a partir de los valores dados, se lee:

- * para $\rho_{pa} = 0.50$, $CR_{med} = 2.50 \%$
- * para $\rho_{pa} = 0.75$, $CR_{med} = 4.10 \%$

interpolando para $\rho_{pa} = 0.60$:

$$\begin{array}{l} 0.25 \text{ ——— } 1.60 \\ 0.10 \text{ ——— } x \end{array}$$

$$x = \frac{0.10 * 1.60}{0.25} = 0.64$$

$$CR_{med} = 2.50 + 0.64 = 3.14, \text{ para } \rho_{te} = 0.70$$

Corrección por $\rho_{te} = 0.60$

$$CR_{med} = 3.14 * 0.90 = 2.80 \%$$

En Gráfica de CR_{min} , para los valores dados, se lee:

- * para $\rho_{pa} = 0.50$, $CR_{med} = 1.80 \%$
- * para $\rho_{pa} = 0.75$, $CR_{med} = 3.30 \%$

Interpolando para $\rho_{pa} = 0.60$:

$$\begin{array}{l} 0.25 \text{ ——— } 1.50 \\ 0.10 \text{ ——— } x \end{array}$$

$$x = \frac{0.10 * 1.50}{0.25} = 0.60$$

$$CR_{min} = 1.80 + 0.60 = 2.40, \text{ para } \rho_{te} = 0.70$$

Corrección para $\rho_{te} = 0.60$:

$$CR_{min} = 2.40 * 0.90 = 2.20 \%$$

3.7.- El factor de luz de día: los coeficientes de corrección.

Como se mencionó en el punto 1, hay factores que afectan el valor dado por la suma de CC, CRE y CRI. Ellos son:

- el vidrio: en la práctica se presentan casos en que la ventana no tiene vidrio (cálculo en espacios exteriores, en terrazas) o que tiene vidrio que puede ser común o especial (doble, reflejante, absorbente).

El coeficiente τ_v tiene en cuenta estas situaciones: se tiene:

$\tau_v = 1$, si no existe vidrio, ya que no hay reducción.

$\tau_v = 0.85$ en el caso de ventana con vidrio común; este coeficiente depende del ángulo con que la luz incide en la ventana; el valor $\tau_v = 0.85$ se toma como valor medio.

En el caso de vidrios especiales, se tomarán los valores dados por el fabricante; se dan algunos valores como referencia:

	τ_v
- 1 solo vidrio tipo: antisun float	0.78
tipo Parsol	0.27
antisun float	0.27
cool-lite SC 20	0.20
solarshield	0.20
- 2 vidrios tipo :	
antisun float + común	0.69
cool-lite SC20 + común	0.19
solarshield + común	0.17

Debe notarse en estos valores la reducción importante que sufre la cantidad de luz cuando se usan vidrios especiales; muchos efectos buscados a través de grandes superficies vidriadas, en que por problemas técnicos debe recurrirse a estos vidrios, se ven malogrados por esta reducción de la luz.

- Los elementos estructurales de la ventana reducen el valor de Fd. La reducción se hace a través del coeficiente Ce, tomándose los siguientes valores:

<u>estructura de la ventana</u>	<u>Ce</u>
metálica	0.88 a 0.82
común de madera	0.82 a 0.76
saliente de madera	0.68 a 0.52

- El mantenimiento (limpieza) del vidrio también provoca la reducción de Fd. Se introduce el coeficiente Cm, tomándose los siguientes valores:

<u>posición del vidrio</u>	<u>en cualquier caso</u>	<u>en zonas industriales</u>
inclinado	0.80	0.70
vertical	0.90	0.80
horizontal	0.70	0.60

- Como expresión final de Fd resulta:

$$Fd = (CC + CRE + CRI) * \tau_v * Ce * Cm$$

3.8.- Ejemplo de cálculo de E_d

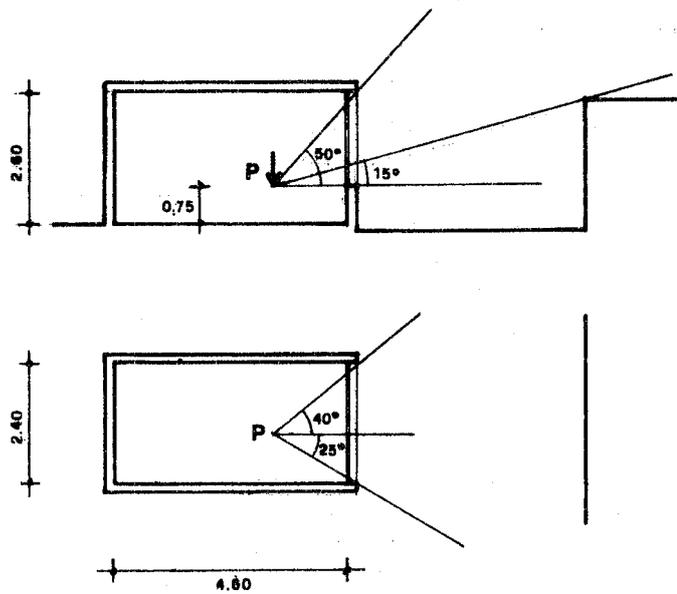


FIGURA 3.8

vidrio común	$\tau_v = 0.85$
ventana común de metal	$C_e = 0.88$
zona no industrial	$C_m = 0.90$

Los valores de CC, CRE y CRI ya fueron calculados:

- en 3.5.1 se tiene: CC = 8.79 %
- en 3.5.1 se tiene: CRE = 0.12 %
- en 3.6 se tiene: CRI = 2.80 % (por la ubicación del punto corresponde usar CRImedio)

$$E_d = (7.79 + 0.12 + 2.80) * 0.85 * 0.88 * 0.90 = 7.60 \%$$

Según ecuación 3.1.2, y tomando el nivel base de cálculo $E_e = 8000 \text{ lx}$, se tiene:

$$E_p = \frac{8000 * 7.6}{100} = 608 \text{ lx}$$

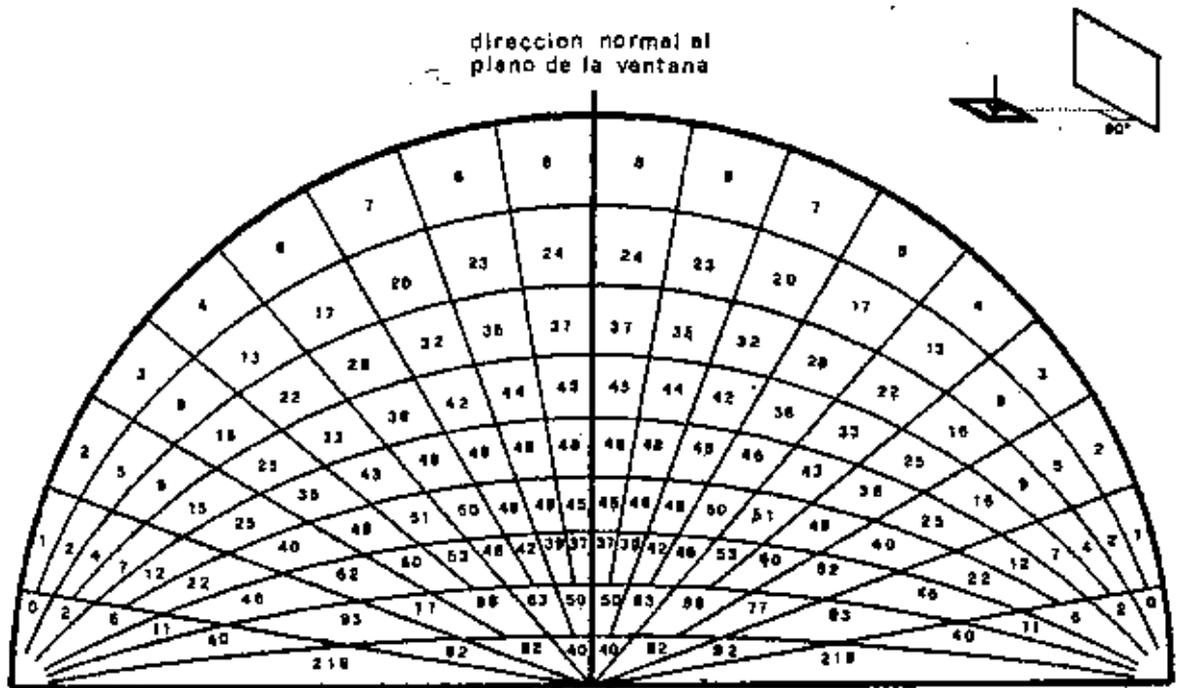
La iluminación en el punto P superará los 608 lx durante el 85.7 % de la jornada de trabajo en todo el año, el 95.9 % en diciembre, enero y febrero y el 73.1 % en junio, julio y agosto. Ver también el punto 2.5.

Debe recordarse aquí que el estudio de iluminación de un local no se limita a la determinación del valor de F_d en alguno de sus puntos, ni siquiera al valor de F_d en los puntos más comprometidos; es de mucho más interés para el arquitecto tener una representación en cortes y en planta de la distribución de la luz en el local, no sólo en el plano de trabajo sino en otras superficies, para verificar si ésta satisface los objetivos que se planteó al proyectar. Puede visualizar así, a través de croquis, los efectos logrados.

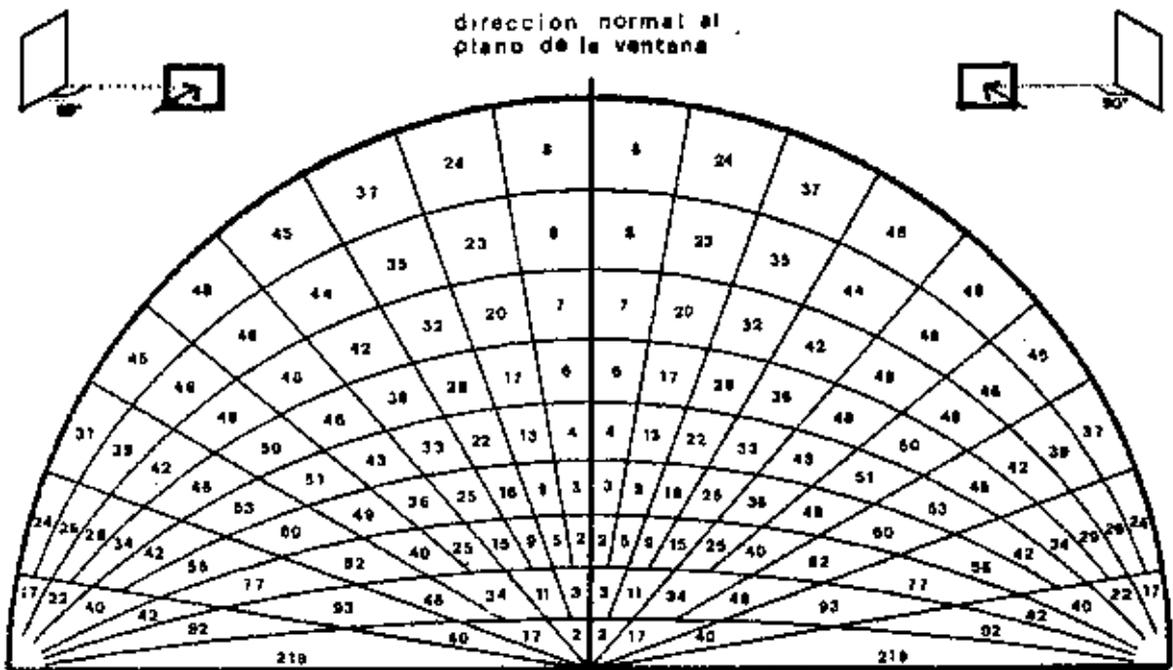
4. BIBLIOGRAFIA

- * Hopkinson, Petherbridge. Longmore. Daylighting. London, Heineman, 1966
- * Hopkinson, R.G. y Collins. J.B. - The ergonomics of lighting. Macdonald Technical and Scientific. London, 1970
- * Girardin, María C. y Echevarría, Cristina. Tablas estereográficas para el cálculo de iluminación natural. Facultad de Arquitectura, Universidad de la República. Montevideo, Uruguay, 1993.
- * Acondicionamiento Físico Natural. Servicio de Climatología Aplicada a la Arquitectura. Facultad de Arquitectura. Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 1993.
- * Rivero, R.. Iluminación Natural. Cálculo de la componente de cielo del factor de día. Montevideo. SCCA. Facultad de Arquitectura. Universidad de la República. SCG, 1971.
- * British Standard Code of Practice. Chapter 1. Lighting. Part 1. Daylight. The Council for Codes of Practice, British Standards Institution, London, 1964.
- * L'éclairage naturel. Cahiers du Centre Scientifique el Technique du Bâtiment, Cahier 90, Paris, 1950.
- * Rivero, R.. La iluminación natural del salón de clase. Revista CEDA No. 26, Facultad de Arquitectura, Montevideo, Uruguay.

FACTOR DE DIA. CALCULO DE LA COMPONENTE DE CIELO.
Cielo de luminancia uniforme. Ventana sin vidrio.

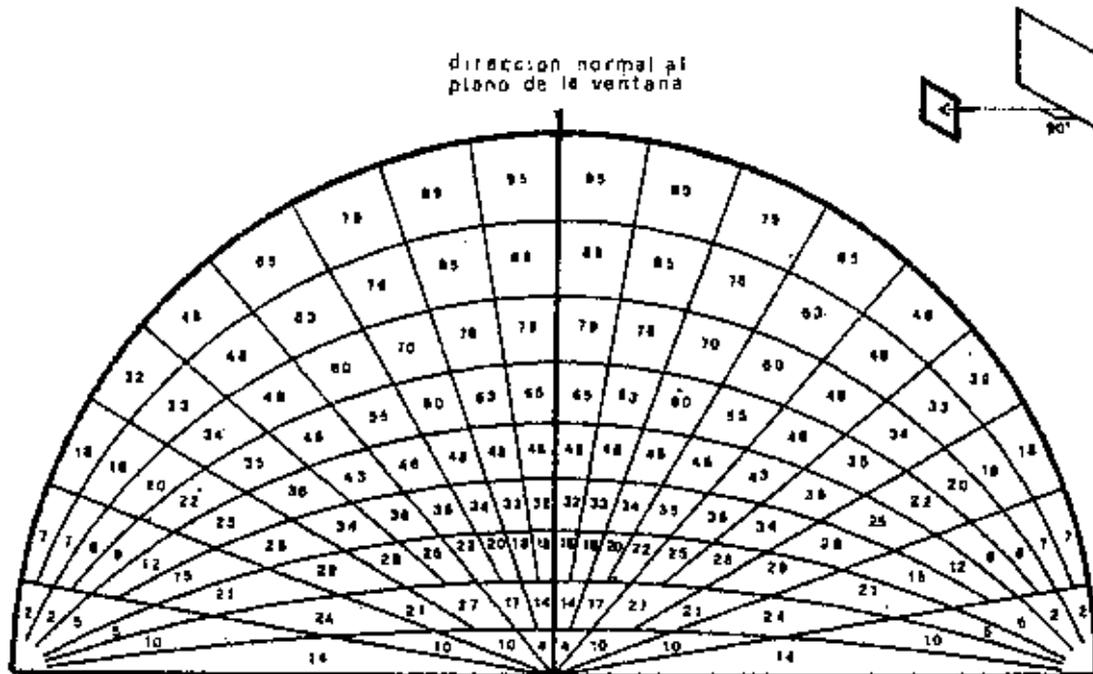


1. VENTANA VERTICAL - COMPONENTE DE CIELO EN PLANO HORIZONTAL



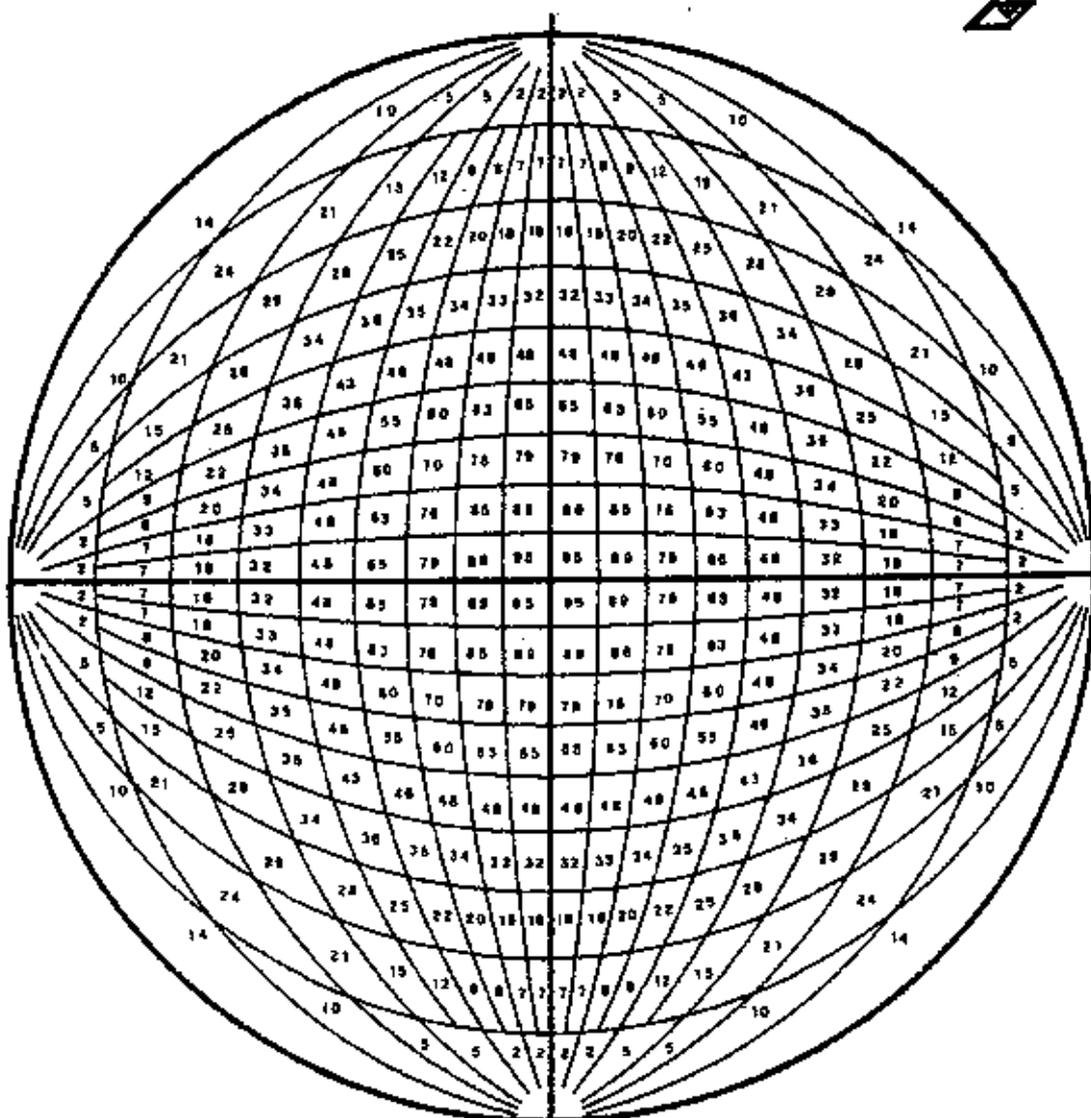
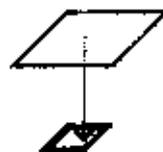
2. VENTANA VERTICAL - COMPONENTE DE CIELO EN PLANO VERTICAL

FACTOR DE DIA. CALCULO DE LA COMPONENTE DE CIELO.
Cielo de luminancia uniforme. Ventana sin vidrio.



3. VENTANA VERTICAL - COMPONENTE DE CIELO EN PLANO PARALELO

FACTOR DE DIA. CALCULO DE LA COMPONENTE DE CIELO.
Cielo de luminancia uniforme. Ventana sin vidrio.



4. VENTANA HORIZONTAL - COMPONENTE DE CIELO EN PLANO HORIZONTAL

FACTOR DE DIA. CALCULO DE LA COMPONENTE REFLEJADA INTERIOR.

Cielo de luminancia uniforme. Ventana sin vidrio.

