

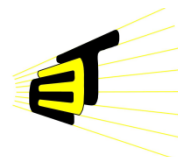
**ANÁLISIS DEL APOORTE LUMÍNICO DE TUBOS SOLARES 290 DS EN EL  
AULA MULTIPROPÓSITO (IE 402) DEL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**CHRISTIAN LEONARDO RAMÍREZ CUEVAS**

**Cód. 2083275**

**DAVID AUGUSTO RAMÍREZ ROA**

**Cód. 2073651**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
DE TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

**ANÁLISIS DEL APOORTE LUMÍNICO DE TUBOS SOLARES 290 DS EN EL  
AULA MULTIPROPÓSITO (IE 402) DEL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**CHRISTIAN LEONARDO RAMÍREZ CUEVAS  
DAVID AUGUSTO RAMÍREZ ROA**

**Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Electricista**

**Director:**

**GERMAN ALFONSO OSMA PINTO  
Magister en Ingeniería Eléctrica**

**Codirector:**

**GABRIEL ORDÓÑEZ PLATA  
Doctor Ingeniero Industrial**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
DE TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIA

A mi Dios primeramente quien ha sido el que nos ha otorgado buena salud, fue el guía y el proveedor en todo tiempo, a mi madre Miryam Stella Cuevas Mojica mujer luchadora a quien le agradezco todo el esfuerzo dado día a día y de la cual me siento muy orgulloso porque fue gracias a ella y por ella que logre llegar hasta la meta y cumplir con este objetivo, a mis tías Yamile Cuevas y Mabel Cuevas que junto con mi abuela Rita Mojica siempre estuvieron al pendiente para brindarme su apoyo en cualquier momento.

Christian Leonardo Ramírez Cuevas

A Dios todopoderoso que me lleno de fortaleza y sabiduría para sacar adelante este proyecto. A mis padres Fabio Augusto y Petra Amparo que me formaron como un ser integral de principios y valores brindándome además la oportunidad de ser profesional. A mis hermanas Judith Amparo y Sara María Fernanda que con su amor fraternal me apoyaron en los momentos difíciles. A mis abuelos Sotero y Stella ejemplo de unión y amor. A mi esposa Juliana, mis hijos David Santiago y María Victoria, mi mayor motivación y aliciente en mi proyecto de vida. A mis tíos que me apoyaron permanentemente. Mis primos que son mis amigos incondicionales, y a mis compañeros y amigos Alexandra Arenas, Christian Ramírez, Gabriel Rojas y Felipe Urazan.

David Augusto Ramírez Roa

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander, por brindarnos los espacios de formación y lograr ser profesionales, a la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones por brindarnos las herramientas necesarias para el buen desarrollo de este trabajo de investigación.

Un agradecimiento muy especial al MSc German Alfonso Osma Pinto, por sus instrucciones, recomendaciones, orientación, apoyo, ejemplo y excelencia en su trabajo como director de esta tesis de grado.

Igualmente agradecemos a nuestro codirector Dr. Gabriel Ordóñez Plata por sus consejos y acompañamiento en este proyecto.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO.....	20
1.1 MARCO REGLAMENTARIO.....	20
1.2 USO RACIONAL Y EFICIENTE DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	20
1.3 LUZ VISIBLE.....	20
1.4 MOVIMIENTO SOLAR APARENTE.....	21
1.5 BRILLO SOLAR.....	24
1.6 EFECTOS TÉRMICOS.....	24
1.7 LA LUZ NATURAL.....	25
1.8 INCIDENCIA DE LA LUZ NATURAL Y ARTIFICIAL SOBRE EL SER HUMANO .....	25
1.9 ILUMINACIÓN NATURAL.....	25
1.10 ILUMINACIÓN DE INTERIORES.....	26
1.11 SISTEMAS DE ILUMINACIÓN NATURAL.....	26
1.12 ILUMINANCIA.....	27
1.13 TUBOS SOLARES.....	27
1.14 IMPORTANCIA E IMPACTOS DE LA ILUMINACIÓN NATURAL EN CLIMAS TROPICALES.....	28
1.15 ENTORNO TROPICAL.....	28
1.16 DIALUX.....	30
2. COMPORTAMIENTO LUMÍNICO APORTADO POR LOS TUBOS SOLARES POR MEDICIONES EN EL AULA IE 402.....	31
2.1 EQUIPOS UTILIZADOS PARA MEDIR LA ILUMINANCIA.....	31
2.2 MEDICIÓN DE LA ILUMINACIÓN EN EL ESPACIO INTERIOR EN EL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA (IE402).....	33

2.3 METODOLOGÍA DE LA MEDICIÓN .....	34
2.4 CARACTERIZACIÓN DEL DF APORTADO POR LOS TRES TUBOS SOLARES PARA UN ENMALLADO DE 15 PUNTOS EN EL AULA IE 402. ....	35
2.5 CARACTERIZACIÓN DEL DF APORTADO POR CADA TUBO SOLAR DEL AULA IE 402.....	39
2.6 CARACTERIZACIÓN DE LA ILUMINANCIA ( <i>E</i> ) APORTADA POR LOS TRES TUBOS SOLARES .....	44
2.7 CARACTERIZACIÓN DE LA ILUMINANCIA ( <i>E</i> ) APORTADA POR CADA TUBO SOLAR DEL AULA IE 402 .....	46
3. COMPORTAMIENTO LUMÍNICO APORTADO POR LOS TUBOS SOLARES POR SIMULACIONES EN DIALUX. ....	50
3.1 MODELO VIRTUAL .....	50
3.1.1 Modelado del interior del aula IE 402.....	50
3.1.2 Inserción de los tubos solares.....	51
3.1.3 Inserción de la trama de cálculo.....	53
3.2 METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN .....	54
3.2.1 Caracterización del Df.....	57
3.2.2 Caracterización de la iluminancia ( <i>E</i> ).....	59
4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE MEDICIONES Y SIMULACIONES .....	61
4.1 ANÁLISIS DEL DF.....	61
4.2 ANÁLISIS DE LA ILUMINANCIA .....	64
4.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE USAR DIALUX.....	66
5. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES.....	68
5.1 CONCLUSIONES .....	68
5.2 OBSERVACIONES.....	69
5.3 RECOMENDACIONES.....	69

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....71

BIBLIOGRAFÍA.....76

ANEXOS .....77

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Espectro visible.....	21
Figura 2. Cambio de declinación del sol respecto al plano del ecuador. ....	22
Figura 3. Variación mensual de la declinación del sol ( $\delta$ ).....	22
Figura 4. Movimiento aparente del sol. ....	23
Figura 5. Luxómetro (Lux 1).....	31
Figura 6. Luxómetro (Lux 3).....	32
Figura 7. Curva y ecuación de corrección. ....	32
Figura 8. Trípode para medir. ....	35
Figura 9. Modelo del enmallado de 15 puntos.....	36
Figura 10. Comportamiento en 3D del Df aportado por los tres tubos solares en el aula IE 402, para las 12:00 m. ....	37
Figura 11. Curvas del comportamiento del Df hora-hora aportadas por los tres tubos solares en el aula IE 402. ....	38
Figura 12. Modelo del enmallado de 27 puntos.....	39
Figura 13. Comportamiento en 3D del Df, aportado por el tubo solar de la parte central del aula IE 402, para las 12:00 m. ....	41
Figura 14. Curvas del Df aportadas por el tubo central, por mediciones. ....	42
Figura 15. Modelo del enmallado de 27 puntos.....	42
Figura 16. Comportamiento en 3D del Df aportado por el tubo solar de la parte norte del aula IE 402, para las 12:00 m.....	43
Figura 17. Curvas del Df aportadas por el tubo norte, por mediciones.....	44
Figura 18. Comportamiento en 3D de la iluminancia (E) aportada por los tres tubos solares en el aula IE 402, para las 12:00 m.....	45
Figura 19. Curvas del comportamiento de la iluminancia (E) hora-hora en el aula IE 402 aportadas por los tres tubos solares. ....	45

Figura 20.	Comportamiento en 3D de la iluminancia (E), aportada por el tubo solar de la parte central del aula IE 402, para las 12:00 m.....	47
Figura 21.	Curvas de la iluminancia (E) aportadas por el tubo centro, por medio de mediciones.....	47
Figura 22.	Comportamiento de la iluminancia (E), aportada por el tubo solar de la parte norte del aula IE 402, para las 12:00 m.....	48
Figura 23.	Curvas de la iluminancia (E) aportadas por el tubo norte, por medio de mediciones.....	49
Figura 24.	Geometría interior del aula IE 402. ....	50
Figura 25.	Inserción de los tubos solares en DIALux. ....	51
Figura 26.	Disposición de los tubos solares en el Aula IE 402. ....	52
Figura 27.	Montaje de los tubos solares en el aula IE 402. ....	53
Figura 28.	Curva de la relación lumen/lux a lo largo del tubo solar. ....	55
Figura 29.	Inserción del flujo luminoso para cada simulación.....	56
Figura 30.	Curvas del comportamiento del Df hora-hora aportadas por los tres tubos en el aula IE 402. ....	57
Figura 31.	Curvas de Df aportadas por el tubo central, por simulaciones. ....	58
Figura 32.	Curvas de Df aportadas por el tubo norte, por simulaciones. ....	58
Figura 33.	Curvas del comportamiento de la iluminancia (E) hora-hora aportadas por los tres tubos en el aula IE 402. ....	59
Figura 34.	Curvas de E aportadas por el tubo central, por simulaciones.....	60
Figura 35.	Curvas de E aportadas por el tubo norte, por simulaciones. ....	60
Figura 36.	Comportamiento medido y simulado. Hora 11:00 am.....	62
Figura 37.	Comportamiento medido y simulado. Hora 4:00 pm.....	62
Figura 38.	Comportamiento promedio diario. ....	63
Figura 39.	Comportamiento medido y simulado. Hora 11:00 am.....	64
Figura 40.	Comportamiento medido y simulado. Hora 4:00 pm.....	64
Figura 41.	Comportamiento promedio diario. ....	66

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Promedio mensual de horas de luz solar para el Edificio IE. ....	24
Tabla 2. Valores de radiación solar, enmallado de 15 puntos. ....	37
Tabla 3. Valores de radiación solar para tubo central, enmallado de 27 puntos...	40
Tabla 4. Df en cada punto del enmallado del tubo solar ubicado en la parte central del aula, a las 12:00 m. ....	41
Tabla 5. Valores de radiación solar tubo norte enmallado 27 puntos. ....	43
Tabla 6. Df en cada punto del enmallado del tubo solar ubicado en la parte norte del aula, a las 12:00 m por medio de mediciones. ....	44
Tabla 7. E (lx) en cada punto del enmallado para el tubo solar ubicado en la parte central del aula, a las 12:00 m por medio de mediciones. ....	46
Tabla 8. E (lx) en cada punto del enmallado para el tubo solar ubicado en la parte norte del aula, a las 12:00 m por mediciones. ....	48
Tabla 9. Resultados a lo largo del tubo solar de la relación lumen/lux. ....	54

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: Conceptos iluminación .....	77
ANEXO B. Curvas de comportamiento lumínico del Df (mediciones) .....	80
ANEXO C. Curvas de comportamiento lumínico del Df (simulaciones) .....	89
ANEXO D. Curvas de comportamiento lumínico de E (mediciones) .....	98
ANEXO E. Curvas de comportamiento lumínico de E (simulaciones) .....	106
ANEXO F. Comparación resultados obtenidos de Df (medición-simulación) .....	115
ANEXO G. Comparación resultados obtenidos de E (medición-simulación) .....	121
ANEXO H. Calculo de la incertidumbre en el proceso de medida .....	127

## RESUMEN

**TITULO:** ANÁLISIS DEL APORTE LUMÍNICO DE TUBOS SOLARES 290 DS EN EL AULA MULTIPROPÓSITO DEL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA (IE402)<sup>\*</sup>

**AUTORES:** Christian Leonardo Ramírez Cuevas\*\*  
David Augusto Ramírez Roa

**PALABRAS CLAVES:** Tubos solares 290 DS, factor de luz diurna, aporte lumínico, iluminación natural, DIALux, simulación.

### DESCRIPCION

El ahorro energético se ha convertido en uno de los factores más importantes en el diseño de edificaciones. Acorde con esto, es necesario investigar y buscar nuevas técnicas para obtener mayor conocimiento sobre los sistemas para el aprovechamiento de la iluminación natural, logrando así hacer uso eficiente y eficaz de la misma.

Con base en lo anterior, este trabajo de grado propone dar una perspectiva sobre el comportamiento de la iluminancia aportada por los tubos solares Solatube 290 DS 14” en el interior del Aula Multipropósito del Edificio de Ingeniería Eléctrica (IE 402) de la Universidad Industrial de Santander, teniendo como factor determinante el clima tropical de la zona geográfica de Bucaramanga. Con su aplicación se busca generar curvas de comportamiento del factor de luz diurna (Df, según RETILAP CLD) y con el cual se pueden describir las características de iluminación del aula.

En la primera etapa del proyecto se midió la iluminancia natural durante las horas de luz solar, con estas lecturas se crearon las curvas de comportamiento de iluminación natural; posteriormente, se trabaja con un modelo 3D en DIALux para simular la iluminación natural en el aula, por último, se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos, donde se muestran las diferencias y similitudes en las mediciones y las simulaciones tanto del Df como de la iluminancia (E).

---

<sup>\*</sup> Trabajo de grado

<sup>\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Tele-comunicaciones. Director: MSc. German Osma Pinto. Co-director: Dr. Gabriel Ordóñez Plata

## ABSTRACT

**TITLE:** ANALYSIS OF CONTRIBUTION LIGHTING TUBE SOLAR 290 DS CLASSROOM MULTI-PURPOSE BUILDING ELECTRICAL ENGINEERING (IE402)<sup>\*</sup>

**AUTHORS:** Christian Leonardo Ramírez Cuevas<sup>\*\*</sup>  
David Augusto Ramírez Roa

**KEYWORDS:** 290 DS solar tubes, daylight factor, lighting contributions, natural lighting DIALux simulation.

**DESCRIPTION:**

Energy saving has become one of the most important building design factors. In line with this, it is necessary to investigate and look for new techniques to get more knowledge about the systems for the use of natural lighting, achieving make efficient and effective use of it.

Based on the above, this degree work aims to provide a perspective on the behavior of illuminance provided by the solar tubes Solatube 290 DS 14 "inside the Multipurpose Classroom Building Electrical Engineering (IE 402) of the Industrial University of Santander, having as determinant the tropical climate of the geographical area of Bucaramanga. Its application is to generate performance curves daylight factor (Df. RETILAP according UNCCD) and with which you can describe the characteristics of classroom lighting.

In the first stage of natural illuminance was measured during hours of sunlight, these readings curves behavior of natural lighting were created; Subsequently, and following the proposed methodology, working with a 3D model in DIALux to simulate natural lighting in the classroom. Finally, a comparative analysis of the results, , a comparative analysis of the results, where the differences and similarities in the measurements are shown and simulations both Df as is done the illuminance (E).

---

<sup>\*</sup> Degree work.

<sup>\*\*</sup> Faculty of Engineering Physics and Mechanics. School of Electrical Engineering, Electronics and Telecommunications. Director: MSc. German Osma Pinto. Co-director: Dr. Gabriel Ordóñez Plata

## INTRODUCCIÓN

La iluminación natural ha sido siempre parte de la arquitectura y se dejó de considerar en algunos casos debido a la disponibilidad de energía eléctrica que se consideraba económica. La previsibilidad y la capacidad de controlar los niveles de iluminación natural fue tenida en cuenta de manera prioritaria hasta la aparición de la luz artificial, momento en el que paso a un segundo plano. Sin embargo en la actualidad una parte importante de la eficiencia energética está basada en la disminución del consumo de la energía eléctrica utilizada en la iluminación artificial [1],[2],[3] y [4].

El aprovechamiento de la luz natural como opción para la iluminación interior es una alternativa para la reducción en el consumo de energía eléctrica en horas diurnas en áreas dentro de las edificaciones, donde se dispone de este recurso [5], [6] y [7]. Esto permite edificaciones más eficientes energéticamente [6], [8] y [9].

Las tecnologías de iluminación natural están asociadas significativamente con la arquitectura bioclimática, a partir de la cual se generan esfuerzos de transformación del modelo tradicional de construcción, aprovechando los recursos del entorno [5] y [8].

En el Edificio de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones esta implementado un sistema de iluminación natural, del cual hacen parte tubos solares Solatube, con el fin de disminuir el consumo energético en el edificio.

Este documento describe el aporte lumínico de los tubos solares 290 DS en entornos tropicales, concretamente en un aula del Edificio de Ingeniería Eléctrica a

partir de mediciones en sitio y simulaciones realizadas por medio del software DIALux.

Para determinar tal información, se realizaron mediciones intensivas en el Aula Multipropósito (IE 402) del Edificio de Ingeniería Eléctrica, con el fin de obtener el aporte de iluminación natural. Para esto se consideró un plano horizontal de referencia a una altura de 0,75 metros, siendo establecidas curvas de comportamiento lumínico natural en el espacio.

Las simulaciones de iluminación natural se realizaron en la herramienta computacional DIALux, que por medio de la definición de características propias del espacio y tiempo permite realizar el modelado virtual del aula IE 402 del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

Finalmente, se realizó un análisis comparativo con los resultados obtenidos en las mediciones y el uso del software DIALux en las simulaciones.

### **Descripción del trabajo**

El trabajo de grado presenta una propuesta documentada, que como objetivo general cuantifica el aporte de iluminación natural de los tubos solares Solatube 290DS14” en el aula multipropósito (IE 402) del Edificio de Ingeniería Eléctrica a partir de mediciones en sitio y simulaciones en DIALux. Para lograr esto se da cumplimiento a los siguientes objetivos específicos:

- Determinar el factor de luz natural en el espacio seleccionado.
- Describir por medio de mediciones de iluminación natural y simulaciones en DIALux el comportamiento lumínico del modelo de tubo solar 290DS14” en el Aula Multipropósito (IE402) del Edificio de Ingeniería Eléctrica para diferentes horas y niveles de radiación solar.

- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos en las mediciones y las simulaciones.

### **Alcance**

La recopilación de información tuvo por objeto obtener el modelo virtual de los espacios interiores del Edificio de Ingeniería Eléctrica realizado en un proyecto de grado anterior y adquirir conocimientos sobre las características de los tubos solares 290 DS.

Se realizó un análisis de la iluminación natural según variación horaria a través de lo cual se estableció curvas de comportamiento lumínico para el aula multipropósito de la E3T.

Finalmente, se realizaron simulaciones del comportamiento lumínico de los tubos solares 290 DS en el aula multipropósito del Edificio de Ingeniería Eléctrica (IE402) mediante el software DIALux, con el fin de establecer las características de los mismos, para el posterior análisis y caracterización de su comportamiento y aporte lumínico. Se tiene en cuenta la ficha técnica del fabricante y lo exigido en el RETILAP.

## **1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO**

En este capítulo se presentan los tópicos generales del trabajo de grado.

### **1.1 MARCO REGLAMENTARIO**

El Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público (RETILAP<sup>1</sup>), establece las reglas generales a tener en cuenta para el diseño los sistemas de iluminación interior y exterior en el territorio colombiano, determinando las exigencias y especificaciones mínimas para que las instalaciones de iluminación garanticen los niveles de calidad de energía lumínica requerida en la actividad visual, la seguridad en el abastecimiento energético, la protección del consumidor y preservación del medio ambiente [10].

### **1.2 USO RACIONAL Y EFICIENTE DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA**

El uso racional y eficiente de la energía eléctrica consiste en satisfacer las necesidades energéticas de un sector con la menor inversión posible de recursos, sin sacrificar los beneficios que esta ofrece. La implementación de fuentes de energía limpia, tecnologías eficientes, concebir políticas energéticas con base en prácticas URE y campañas de concientización sobre el desperdicio de energía y producción de desechos, contribuirán en beneficios de gran impacto económico y ambiental [6] y [11].

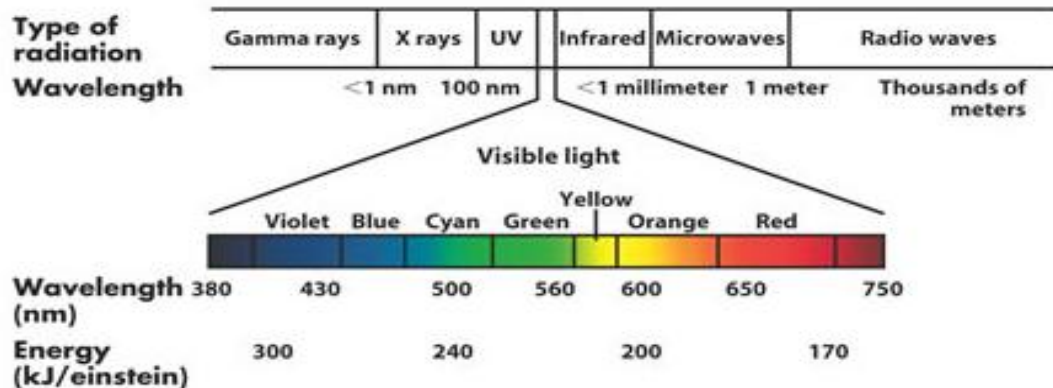
### **1.3 LUZ VISIBLE**

La Figura 1 muestra la franja de la luz visible, la cual es un fragmento del espectro electromagnético para el cual el ojo humano percibe los objetos.

---

<sup>1</sup> RETILAP

**Figura 1. Espectro visible.**



**Fuente: Fernando Pino. “el espectro visible de luz”, Colombia 2011**

La franja visible del espectro electromagnético comprende un rango de longitudes de onda que va desde los 780 [nm]<sup>2</sup> (color rojo) a 380 [nm] (color violeta) [12].

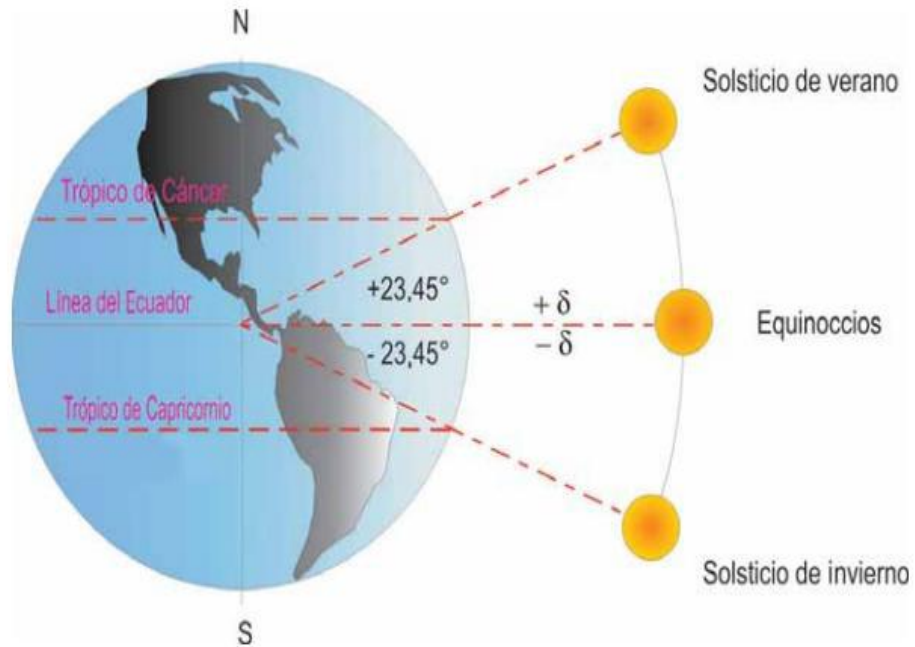
#### 1.4 MOVIMIENTO SOLAR APARENTE

La cantidad y distribución de luz solar a través de una abertura de muro depende fundamentalmente de la coordinación entre la orientación del muro y el movimiento aparente solar, que se ve afectado por la fecha, la hora y latitud de la zona[13] y [14].

Como se puede apreciar en las figuras 2 y 3, a partir de la fecha se puede conocer la declinación del sol respecto al plano del Ecuador, siendo máxima para el solsticio de verano (21 de junio), mínima en el solsticio de invierno (22 de diciembre) y siendo cero en los equinoccios de primavera y otoño [14] y [15]. En el caso de las zonas tropicales, cuando la declinación solar coincide con la latitud de una determinada zona, la radiación solar incide perpendicularmente a la superficie terrestre [14].

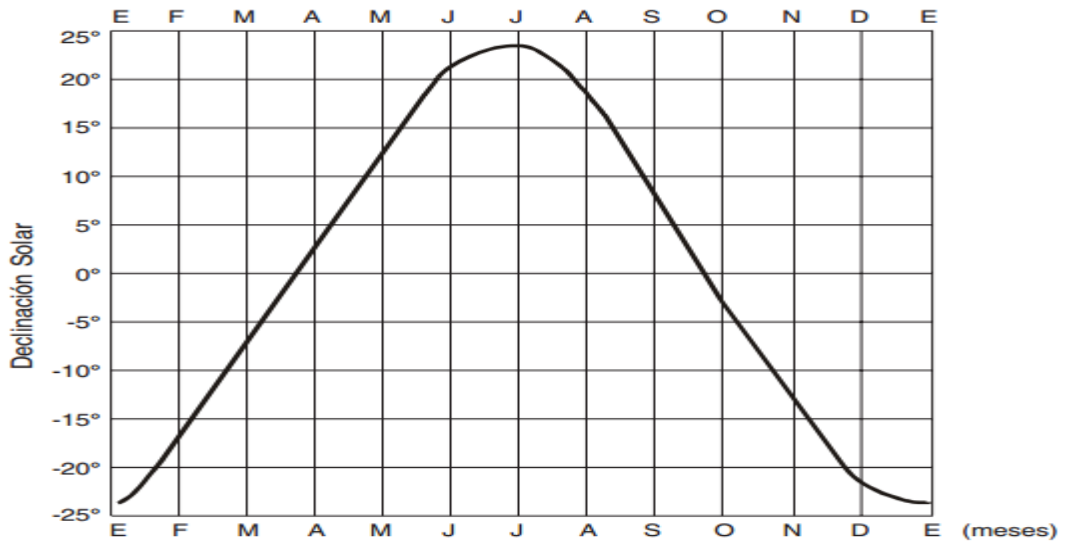
<sup>2</sup> [nm]: nanómetros

Figura 2. Cambio de declinación del sol respecto al plano del ecuador.



Fuente: MACIAS, A. M. and ANDRADE, J. "Estudio de generación bajo escenarios de cambio climático," Bogotá, Colombia, 2014

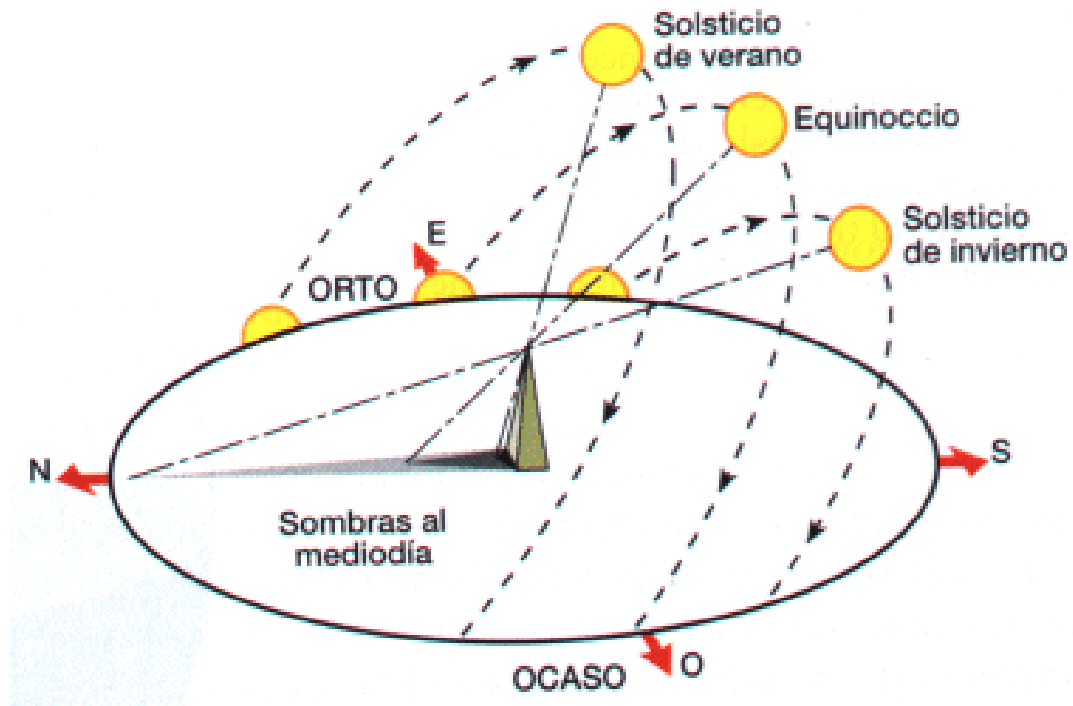
Figura 3. Variación mensual de la declinación del sol ( $\delta$ ).



Fuente: MACIAS, A. M. and ANDRADE, J. "Estudio de generación bajo escenarios de cambio climático," Bogotá, Colombia, 2014

Lo anterior conlleva a que las coordenadas por donde sale el sol y se pone cambien mensualmente como se muestra en la Figura 4. El primer día de la primavera y del otoño el sol sale exactamente por el este y se oculta por el oeste. Al acercarse al solsticio de verano, las posiciones de salida y ocaso avanzan hacia el norte, aumentando también el recorrido del sol en el cielo, que es máximo en este solsticio (día más largo) [15], lo que conlleva a tener el máximo promedio mensual de horas de luz solar como está indicado en la Tabla 1. Desde el equinoccio de otoño la salida y puesta del sol retroceden hacia el sur, alcanzando la trayectoria del sol un valor mínimo en el solsticio de invierno (día más corto) [15], provocando menor promedio de horas de luz solar y de los promedios más bajos de insolación incidente sobre una superficie horizontal. La Tabla 1 presenta la duración diaria promedio de exposición solar para la ciudad de Bucaramanga (Latitud: 7,103; Longitud: -73,103).

**Figura 4. Movimiento aparente del sol.**



Fuente: MACIAS, A. M. and ANDRADE, J. "Estudio de generación bajo escenarios de cambio climático," Bogotá, Colombia, 2014.

**Tabla 1. Promedio mensual de horas de luz solar para el Edificio IE.**

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tiempo promedio	11,7	11,9	12,0	12,2	12,4	12,5	12,5	12,3	12,1	11,9	11,8	11,7

Fuente: NASA, "NASA Surface meteorology and Solar Energy: RETScreen Data," 2014. [Online].

Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>. [Accessed: 23-Sep-2015]

El ángulo con el que la luz solar incide sobre cierta superficie o edificación dependerá de la hora, debido a la semicircunferencia que traza el sol desde su salida hasta su puesta. En Bucaramanga la hora de salida oscila entre las 5:34 y 6:11 mientras que el ocaso está entre 17:30 y 18:13 [16].

### **1.5 BRILLO SOLAR**

Tiempo que incide la luz solar directamente sobre un área entre el alba y el atardecer, el total del tiempo de incidencia depende del clima propio del lugar. El conocimiento de estos datos permite tener un estimado de la cantidad de luz día disponible para sus diferentes usos [17].

### **1.6 EFECTOS TÉRMICOS**

El uso de luz natural produce efectos térmicos debido a la radiación electromagnética, que como consecuencia modifica la distribución térmica, debido a la radicación infra roja proveniente del sol [6], [7] y [8].

Otro aspecto que se debe considerar adicionalmente, es el efecto del deterioro (principalmente radiación ultra violeta (UV)) de los objetos por la exposición prolongada a la luz directa, causando decoloración, sobrecalentamiento y por consiguiente comprometiendo la vida útil y el aspecto de los objetos [6] y [8].

## **1.7 LA LUZ NATURAL**

La luz natural es la principal fuente luminosa de mayor eficiencia que proporciona un contraste perfecto de colores. Las características y disponibilidad de la luz natural depende de factores meteorológicos, hora del día, ubicación geográfica, y época del año entre otros [7], [8] y [18]. La luz natural está compuesta por luz solar directa que es el haz de luz emitido directamente por el sol, y la luz del cielo que es luz difusa reflejada en la atmosfera [5] y [18].

## **1.8 INCIDENCIA DE LA LUZ NATURAL Y ARTIFICIAL SOBRE EL SER HUMANO<sup>3</sup>**

La luz es el principal factor de incidencia sobre el reloj biológico de las personas; una variación de la sincronización de este influye en el estado de ánimo a raíz de cambios tanto fisiológicos como psicológicos [6], [8] y [18]. Estos cambios sobre las personas pueden mejorar su rendimiento, avivar su estado de alerta, entre otros [6] y [8].

La luz percibida a través del ojo humano controla numerosos procesos fisiológicos y psicológicos (el sueño, estado de ánimo, entre otros), así como las actividades cotidianas [6] y [22].

## **1.9 ILUMINACIÓN NATURAL**

La iluminación natural consiste en utilizar de una manera útil y adecuada la luz natural proveniente de la energía radiante del sol al interior del recinto a iluminar, con el fin de aportar y/o lograr los niveles de iluminación requeridos para el desarrollo de actividades al interior de este [8] y [19].

---

<sup>3</sup> Ver Anexo A efectos de la mala iluminación.

## **1.10 ILUMINACIÓN DE INTERIORES**

La iluminación de interiores se define como el procedimiento para llevar al anterior o garantizar la cantidad de flujo luminoso necesario dentro de un local a fin de garantizar niveles de iluminación adecuados para cada actividad particular a desarrollar dentro de este [13] y [19]. Las metodologías, equipos, elementos y materiales utilizados para iluminar son de gran variedad y es a criterio del profesional de iluminación decidir la mejor opción para llevar a cabo una correcta iluminación del recinto [18] y [19].

## **1.11 SISTEMAS DE ILUMINACIÓN NATURAL**

Se denomina sistema de iluminación natural al conjunto de componentes que en un edificio o construcción son utilizados para iluminar con luz natural. La cantidad, la calidad y la distribución de la luz interior depende del funcionamiento conjunto de los sistemas de iluminación, ubicación de las aberturas y de las superficies envolventes [1] y [13].

Básicamente, existen 3 tipos de sistemas de iluminación natural: iluminación lateral, cenital y combinada [1] y [13]. Mientras la iluminación lateral aprovecha la luz solar que ingresa por los costados del edificio, la iluminación cenital es más dinámica aprovechándose de la posición del sol y su incidencia en el techo [13].

Los sistemas de iluminación cenital se caracterizan por su potencial para iluminar con calidad y cantidad, obteniendo más fácil iluminación homogénea que en el caso lateral, además de que se puede conseguir una iluminación profunda, pero por si solos estos sistemas presentan problemas de calentamiento excesivo, deslumbramientos y reflejos molestos [13] y [20].

## 1.12 ILUMINANCIA

La iluminancia o nivel de iluminación se define como el flujo luminoso que incide sobre una superficie por unidad de área. Su símbolo es E y su unidad de medida es el lux (lx) [33].

$$E = \frac{\Phi}{s} [lx] \quad (1.1)$$

$$lx = \frac{lumen}{m^2} \quad (1.2)$$

Donde:

E= iluminancia

$\Phi$ = flujo luminoso

S= superficie por unidad de area

## 1.13 TUBOS SOLARES

Un tubo de luz es un dispositivo diseñado para transportar luz desde una fuente de luz o algún punto a una distancia con pérdidas mínimas, a través de una guía por medio de reflexión interna total. Los tubos de luz son usualmente hechos de materiales altamente reflectivos tales como: resinas acrílicas, policarbonatos, vidrio entre otros. Una guía de luz puede ser usada para transmitir luz natural desde el exterior hasta el interior de una edificación [21], [29], [30] y [31].

El tragaluz tubular o tubo de luz solar Solatube permite iluminar pequeños y grandes espacios con luz natural. Solatube ahorra energía gracias a la utilización de una avanzada tecnología que transporta la máxima cantidad de luz solar desde el exterior hasta en interior de las estancias.

Este tubo solar puede combinarse con la última tecnología LED para así combinar luz natural con un anillo de led ofreciendo el mayor ahorro energético posible, ahorrando hasta un 90% en el consumo de energía eléctrica consumida por los

sistemas de iluminación artificial. La claraboya exterior está diseñada con una tecnología capaz de captar los rayos solares de forma más eficiente y no permitiendo la entrada de calor o problemas de humedad [21], [30] y [31].

#### **1.14 IMPORTANCIA E IMPACTOS DE LA ILUMINACIÓN NATURAL EN CLIMAS TROPICALES**

La importancia de la implementación de sistemas híbridos (luz solar y luz artificial), nace de la necesidad de atenuar los efectos del calentamiento global, como parte del diseño de edificaciones amigables con el medio ambiente o edificios verdes [13].

Al comparar el uso de la luz día como fuente de iluminación y los sistemas de iluminación artificiales ofrecen información sobre las ventajas y desventajas de los sistemas híbridos; sin embargo, al profundizar en estos aspectos se encuentra la complejidad de los factores que involucran esta comparación [13].

La iluminación disponible por las mejores condiciones de luz del día es mucho mayor que la aportada por la artificial; por otra parte la luz día es una cantidad muy variable. Al realizar mediciones fotométricas se pueden observar que pueden ocurrir cambios notables en la intensidad de luz en periodos cortos de tiempo. Por tanto, es deseable seleccionar diseños que propendan por mantener constante la intensidad de luz dentro de un espacio de trabajo [23].

#### **1.15 ENTORNO TROPICAL**

El clima tropical es un tipo de clima típico de los trópicos, se localiza entre la 0 ° latitud, Ecuador y la 23 ° latitud norte y sur, hasta los Trópicos de Cáncer y Capricornio respectivamente. Las temperaturas medias mensuales son elevadas y bastante uniformes a lo largo del año, siendo la media anual superior a los 20°C.

Nunca llegan a temperaturas bajo cero (0°C), sin importar si es árido o húmedo, la temperatura media mínima son 18°C y la temperatura máxima es entre 23°C y 24°C. El régimen térmico varía entre 3°C y 10 °C mayor en el interior y menor en las zonas costeras. Se caracteriza porque en todas sus divisiones, se encuentra bastantes definidas 2 estaciones: una estación seca y una estación húmeda. Alternan las estaciones secas y lluviosas. En función de la distribución estacional de las precipitaciones [24], [25] y [26].

El clima tropical se debe al ángulo de incidencia de la radiación solar que se produce en estas regiones (casi perpendicular al suelo todo el año). Esto hace que la temperatura sea alta y que las variaciones diurnas sean también muy altas. Ante esto el flujo de evaporación desde el suelo también es alto por lo que la humedad suele ser alta. A esto se le añade que el Ecuador es la región terrestre donde se encuentran los vientos fríos de un hemisferio (que está en invierno-otoño) con los de su opuesto, que serán más cálidos (por estar en verano-primavera), lo cual produce un estado de bajas presiones constantes llamado zona de convergencia intertropical lo que produce precipitaciones constantes e intensas durante la mayor parte del año [27].

Los climas tropicales además de tener una temperatura media mensual de 18 °C se caracterizan por no sufrir heladas. Por tanto, los términos verano o invierno no tienen significado en estas zonas, por lo que se suele decir que no tienen invierno (el clima tropical no conoce el invierno). La diferencia de temperatura media anual (también llamada oscilación térmica media anual) es pequeña, y algunos días la propia oscilación térmica diaria a menudo puede superar a la anual. Estas características hacen que se diga a menudo que "la noche es el invierno de los trópicos". La oscilación es aún menor cuanto más se acerca se está del Ecuador. En zonas tropicales áridas estas reglas varían, por lo que éstas suelen agruparse como desérticas [26] y [27].

Al situarse en el Ecuador estas zonas se encuentran en la región de encuentro de vientos de ambos hemisferios (que además están en estaciones opuestas) por lo que se genera una zona de bajas presiones constantes llamada zona de convergencia intertropical, que además puede generar zonas satélites. Esta banda tiene la capacidad de trasladarse norte-sur en función del ángulo de inclinación del sol y la época del año. Esta zona se caracteriza por la alta frecuencia de vientos ascendentes, lo que provoca desarrollos verticales de nubes de lluvia. En la zona tropical se produce un movimiento ascendente del aire debido a su calentamiento. Esta ascensión del aire origina las lluvias de convección, las precipitaciones oscilan entre 400 y los 1000 mm anuales y hay algunos meses secos [26] y [27].

En el clima tropical, en realidad hay abundante cantidad de luz del día, pero se usa con poco impacto. La iluminación externa excesivamente alta e impredecible podría causar no uniforme distribución de iluminancia interior y las molestias visuales [28].

### **1.16 DIALUX**

Es un software gratuito, potente, de fácil uso, que facilita una gama alta de posibilidades en cuanto a modelado 3D, permitiendo modelar ambientes interiores y exteriores, con cálculos que involucren la iluminación artificial y/o iluminación diurna. Trabaja conjuntamente con archivos CAD, modelos 3D procedentes de internet y actualizaciones de las luminarias de una gran lista de fabricantes de luminarias líderes a nivel mundial. Documenta los resultados de los parámetros luminotécnicos en forma textual y gráfica (visualizaciones foto realistas) de manera sencilla y eficaz, incluyendo en estos resultados en la evaluación energética [22].

## 2. COMPORTAMIENTO LUMÍNICO APORTADO POR LOS TUBOS SOLARES POR MEDICIONES EN EL AULA IE 402.

Este capítulo muestra el procedimiento de medición, con el fin de caracterizar el comportamiento lumínico a partir del nivel de iluminancia (E) y del coeficiente de luz diurna (Df) de los tubos solares en el Aula Multipropósito (IE 402) del Edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

### 2.1 EQUIPOS UTILIZADOS PARA MEDIR LA ILUMINANCIA

Para la realización y toma de mediciones correspondientes a este trabajo de grado se utilizaron dos luxómetros, la Figura 5 muestra el luxómetro de marca AMPROBE LM-120, el cual se ubicó en la terraza del Edificio de Ingeniería Eléctrica denominado como Lux 1 y en la Figura 6 el luxómetro de marca EXTECH que se ubicó dentro del Aula IE 402 denominado como Lux 3.

**Figura 5. Luxómetro (Lux 1)**

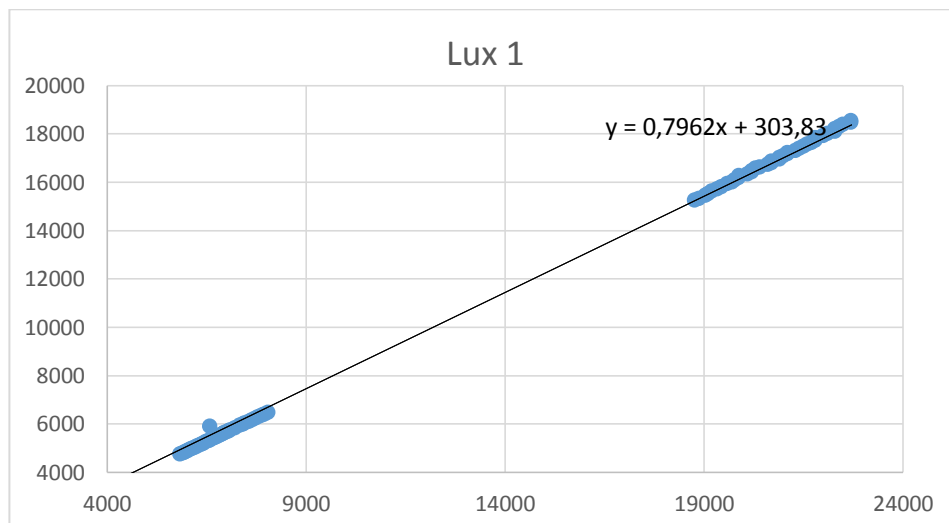


**Figura 6. Luxómetro (Lux 3)**



Como el luxómetro denominado Lux 1 no está calibrado se realizó una serie de mediciones en diferentes horas del día para obtener la curva que se muestra en la Figura 7 junto con su respectiva ecuación de corrección para aplicarla a cada uno de los datos medidos con este luxómetro y así obtener una medición confiable.

**Figura 7. Curva y ecuación de corrección.**



Es necesario realizar la estimación de la incertidumbre asociada a los resultados obtenidos, con el fin de que quienes utilicen los datos mostrados en este trabajo

de grado puedan evaluar la idoneidad de la medición. Es conveniente que el resultado de la medida vaya acompañado de alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado. Para que las mediciones puedan compararse entre sí y con otros valores de referencia y poder validar hasta cierto punto las curvas obtenidas.

Es posible reducir la incertidumbre en el proceso de medición si se realiza con equipos certificados con baja incertidumbre y con metodologías de medición más completas y complejas. Los cálculos de incertidumbre para cada punto del espacio del Aula Multipropósito (IE 402) se encuentran en el Anexo H.

## **2.2 MEDICIÓN DE LA ILUMINACIÓN EN EL ESPACIO INTERIOR EN EL EDIFICIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA (IE402)**

Tomando como referencia la radiación solar medida por el sensor ubicado dentro del Aula Multipropósito (IE 402) y la radiación solar medida por el sensor ubicado en la terraza del edificio, el procedimiento de medición se centra en describir el comportamiento del coeficiente de luz diurna (Df), con lo cual se obtiene la mejor descripción de las características aportadas por los tubos solares 290 DS en el aula.

De aquí en adelante el factor de luz diurna se representa por la abreviatura Df por sus siglas en inglés Daylight Factor y no por medio de las siglas presentadas por el RETILAP CLD (coeficiente de luz diurna). Se define como la iluminación de luz natural medida en un punto situado en un plano determinado, debido a la luz recibida directa o indirectamente desde un cielo de supuesta o conocida distribución de iluminación y se expresa en porcentaje.

Según el Artículo 410.2.1 del RETILAP, el coeficiente de luz diurna promedio de un espacio interior (CLD) o factor de luz diurna (Df) se calcula como se expresa la Ecuación 2.1.

$$Df = \frac{E_{int}}{E_{ext}} \quad (2.1)$$

El término  $Df$  es la relación porcentual de la iluminancia interna producida por la luz natural a la altura del plano de trabajo ( $E_{int}$ ) y la iluminancia en el exterior ( $E_{ext}$ ) [16].

### 2.3 METODOLOGÍA DE LA MEDICIÓN

El  $Df$  se mide según lo indicado en la sección 490 del RETILAP. Para lograr una medición correcta, el espacio debe ser mallado y la iluminancia medida en el centro de cada sección a la altura del plano de trabajo. La iluminancia promedio del área total se puede obtener al promediar todas las mediciones. Este método aplica tanto para iluminación natural como para la artificial, teniendo en cuenta que el aporte artificial se debe medir de noche o evitando el ingreso de iluminación natural, para lo cual se han de tapar las aberturas.

En la toma de lecturas el equipo de medida (luxómetro digital) se debe colocar en una base que garantice la distancia del suelo al plano de trabajo. Según RETILAP una altura de 0,75 metros para trabajos hechos sentados y 0,85 metros para trabajos hechos de pie [16].

Para tomar las lecturas, se coloca el sensor del luxómetro paralelo al plano de trabajo y a la altura del mismo. Esta altura se garantiza mediante una base tripoidal según se muestra la Figura 8, en la cual se ubica el sensor que tiene un grosor de 2 cm y la base de 73 cm, el visualizador del equipo de medida se asegura a la base inferior del trípode. Todas las lecturas se realizan con los ventanales del aula totalmente cubiertos.

**Figura 8. Trípode para medir.**

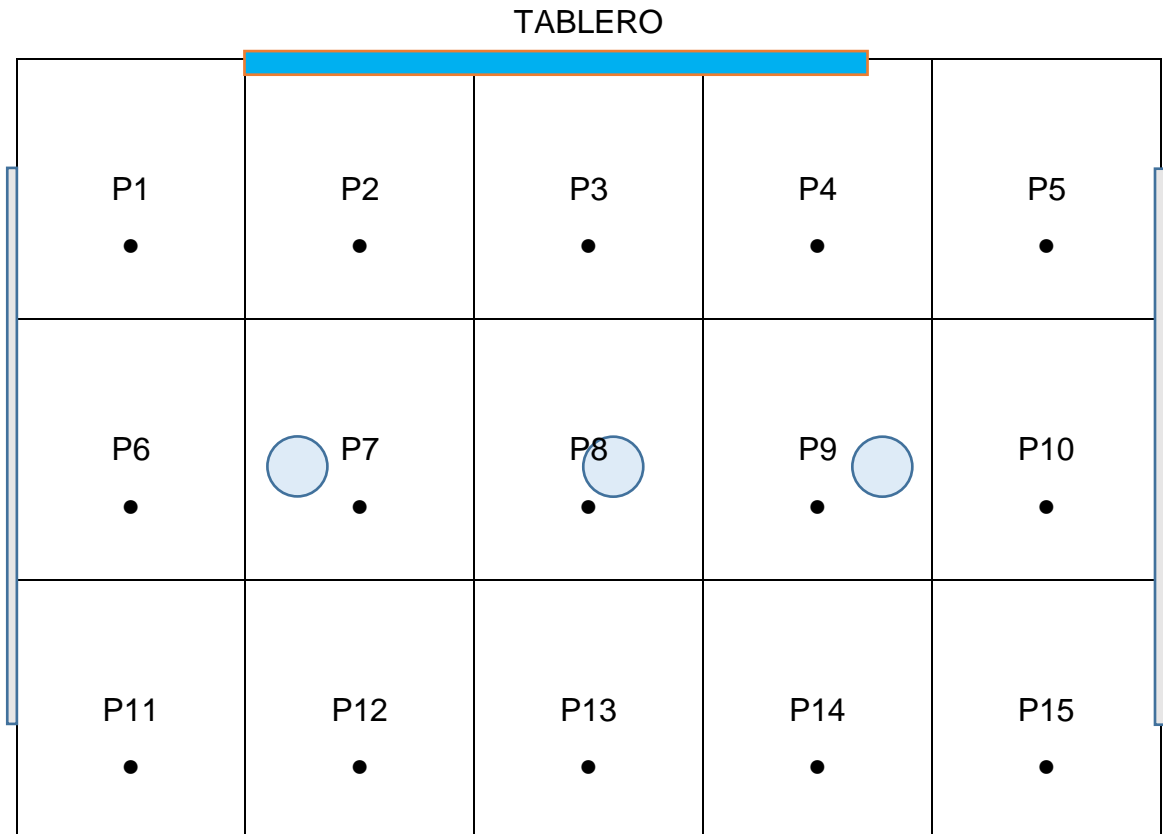


#### **2.4 CARACTERIZACIÓN DEL DF APORTADO POR LOS TRES TUBOS SOLARES PARA UN ENMALLADO DE 15 PUNTOS EN EL AULA IE 402.**

Para establecer la trama de puntos a medir en cada lugar, se procede a levantar un enmallado según la Sección 490.1 del RETILAP, donde se divide el área de cada espacio en cuadrados y se ubica el punto a medir en el centro de cada cuadro [16].

Como se puede observar en la Figura 9. Para efectos de esta parte del trabajo de grado, donde se hace uso de los 3 tubos solares para caracterizar el comportamiento del Df, el enmallado o matriz cuenta con 15 puntos.

**Figura 9. Modelo del enmallado de 15 puntos.**



Una vez demarcado el enmallado, se realiza el procedimiento de medición de la siguiente manera: se toman tres lecturas en cada punto trazado en el enmallado esperando un lapso de tiempo entre cada medida para que la lectura se estabilice, al finalizar la última medida del último rectángulo del enmallado, el proceso se repite, es decir al finalizar todas las lecturas, se tienen 6 mediciones por cada punto trazado en el enmallado. Cada lectura se toma durante un intervalo de tiempo de una hora es decir se toman las lecturas correspondientes a un espacio y este proceso se repite una hora después, llevándolo a cabo desde las 11:00 am

hasta las 5:00 pm., horario para el cual se tienen los valores de radiación solar como se muestra en la Tabla 2.

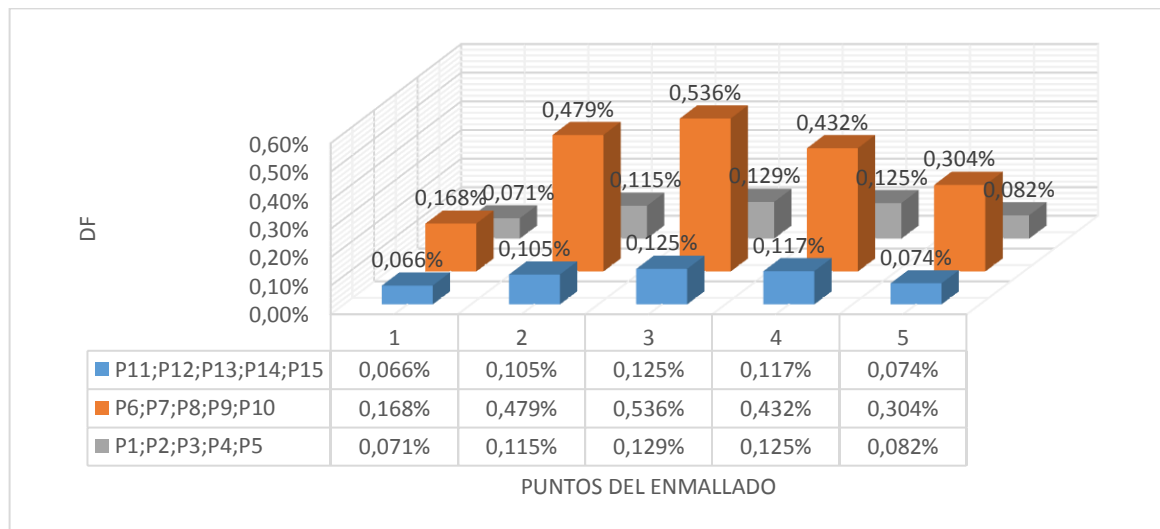
**Tabla 2. Valores de radiación solar, enmallado de 15 puntos.**

HORA	# DATOS TOMADOS	RADIACION[W/m <sup>2</sup> ]
11:00 am	270	676,9
12:00 m	270	831,3
1:00 pm	270	600,1
2:00 pm	225	264,0
3:00 pm	270	468,8
4:00 pm	270	243,4
5:00 pm	225	56,7

### Curvas del comportamiento del Df en el aula IE 402

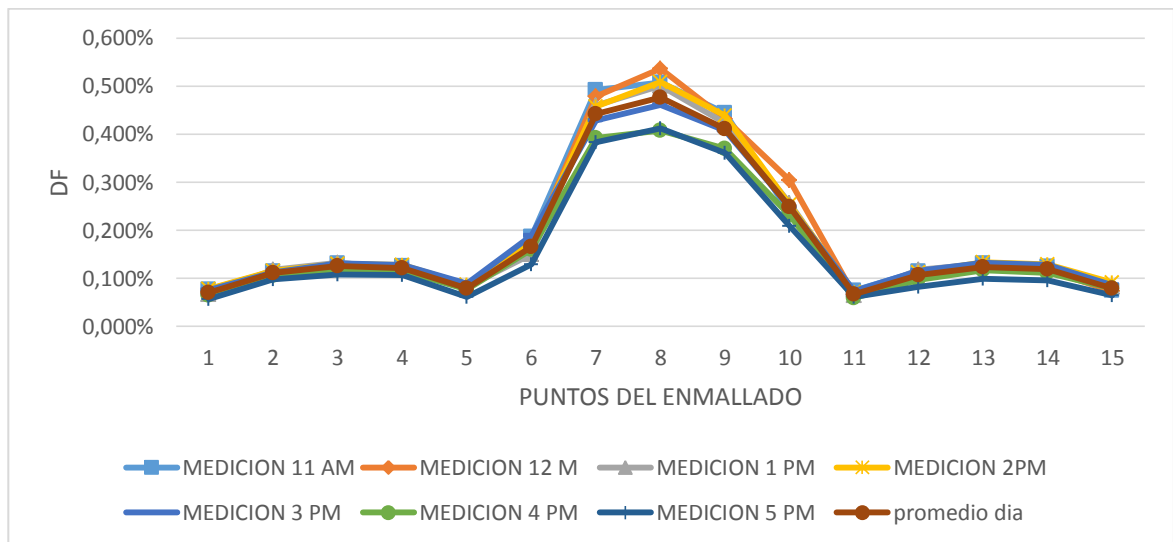
A continuación se presenta los resultados del cálculo del Df en el Aula Multipropósito (IE 402) del Edificio de Ingeniería Eléctrica usando la metodología de la Ecuación 2.1. La Figura 10 describe el comportamiento del Df en todos los puntos del espacio para las 12:00 m según la radiación solar incidente en la terraza.

**Figura 10. Comportamiento en 3D del Df aportado por los tres tubos solares en el aula IE 402, para las 12:00 m.**



Las curvas resultantes en la Figura 11 detallan una conducta similar del Df respecto a la radiación solar incidente en la terraza durante el día. Se puede observar un comportamiento coherente en donde el Df es mayor en los puntos más cercanos y directos a los tubos solares y disminuye al incrementar la distancia respecto a los mismos. Como las curvas de la Figura 11 son similares, se promedia los resultados para obtener una curva representativa del Df para el Aula Multipropósito (IE 402).

**Figura 11. Curvas del comportamiento del Df hora-hora aportadas por los tres tubos solares en el aula IE 402.**



A partir de la curva característica promedio se puede estimar la iluminancia interior usando la Ecuación 2.2. Como la iluminancia exterior cambia a medida que pasa el tiempo, entonces se obtiene una expresión de la iluminancia interna como una función del tiempo:

$$E_{int}(t) = DF * E_{ext}(t) \quad (2.2)$$

La Ecuación 2.2 permite determinar la iluminación en cualquier punto de la trama de puntos del aula en un instante de tiempo  $t$ . Donde el Df depende de los



la terraza del edificio, tomando estas medidas simultáneamente, haciendo uso de 2 luxómetros digitales, uno para cada área.

Se toman dos lecturas en cada punto trazado en el enmallado esperando un lapso de tiempo para que la lectura se estabilice. Al finalizar la última medición, el proceso se repite, lo cual indica que al finalizar todas las lecturas, se tienen 4 mediciones por cada punto trazado en el enmallado. Cada lectura se toma durante un intervalo de tiempo de una hora es decir se toman las lecturas correspondientes a un espacio y este proceso se repite una hora después, llevándolo a cabo desde las 11:00 am hasta las 5:00 pm. En la Tabla 3 se puede observar los valores de radiación solar.

**Tabla 3. Valores de radiación solar para tubo central, enmallado de 27 puntos.**

HORA	# DATOS	RADIACION[W/m <sup>2</sup> ]
11:00 am	324	791
12:00 m	324	727
1:00 pm	324	605
2:00 pm	108	684
3:00 pm	324	310
4:00 pm	324	150

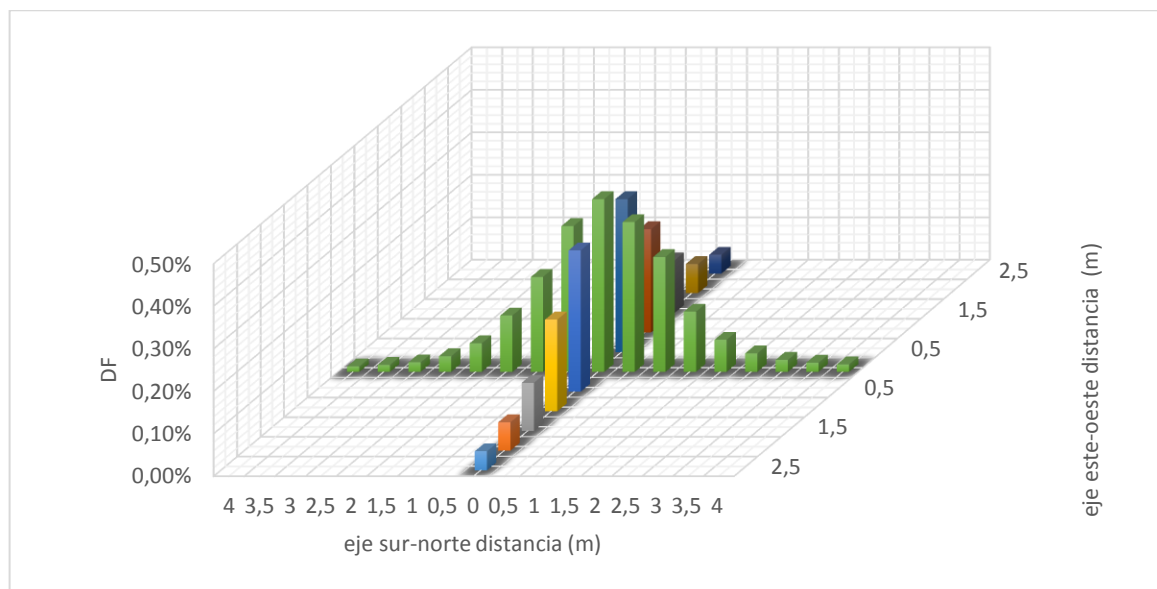
Los resultados obtenidos en el procedimiento de medición se describen mediante las curvas de comportamiento lumínico, donde se realiza la gráfica el DF respecto a la distancia en un eje cartesiano, tomando como origen el punto ubicado exactamente debajo del tubo central del aula y se incrementa la distancia hacia las cuatro direcciones. El cálculo del DF se realiza según la Ecuación 2.1

A continuación se presenta los resultados del cálculo del comportamiento del Df en el aula. La Figura 13 describe el comportamiento del Df en todos los puntos del espacio para las 12:00 m, según la radiación solar incidente en la terraza. La Tabla 4 muestra la información equivalente al valor del Df en cada uno de los puntos correspondientes a la Figura 13.

**Tabla 4. Df en cada punto del enmallado del tubo solar ubicado en la parte central del aula, a las 12:00 m.**

Factor de luz diurna respecto a la incidencia en la terraza aula multipropósito							
punto	%Df	punto	%Df	punto	%Df	punto	%Df
P1	0,407	P2	0,360	P3	0,243	P4	0,124
P5	0,069	P6	0,044	P7	0,332	P8	0,216
P9	0,113	P10	0,067	P11	0,045	P12	0,343
P13	0,223	P14	0,133	P15	0,067	P16	0,037
P17	0,022	P18	0,017	P19	0,013	P20	0,353
P21	0,270	P22	0,142	P23	0,076	P24	0,043
P25	0,028	P26	0,022	P27	0,018		

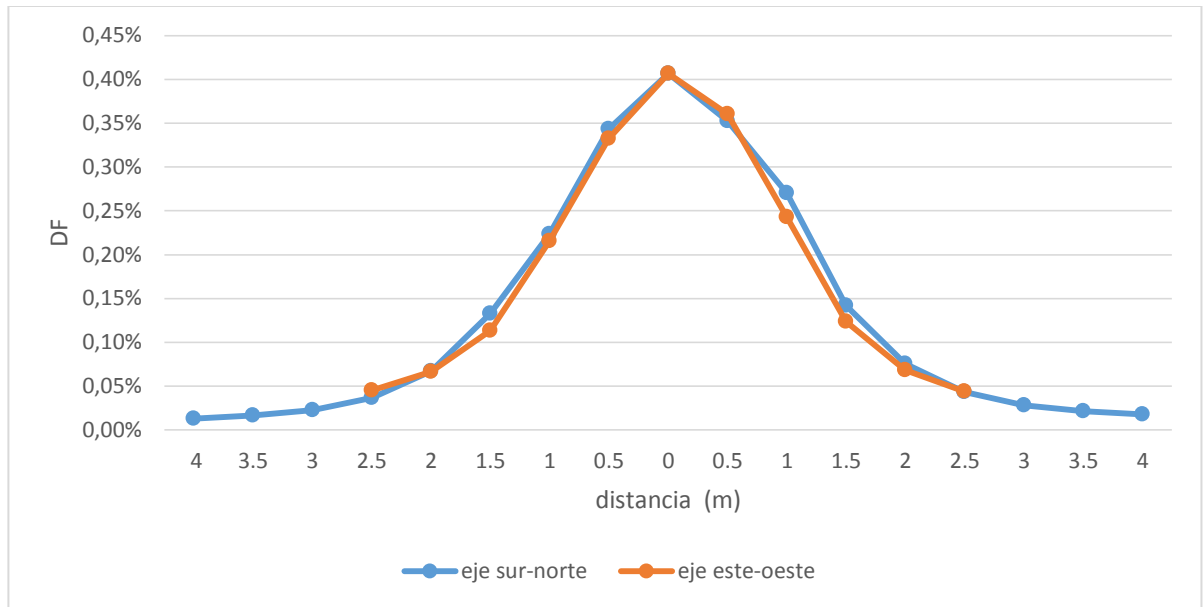
**Figura 13. Comportamiento en 3D del Df, aportado por el tubo solar de la parte central del aula IE 402, para las 12:00 m.**



Se observa que el comportamiento del Df aportado únicamente por el tubo solar ubicado en la parte central del aula es de forma exponencial decreciente, lo cual se puede constatar con la Figura 14.

De igual manera se realiza la gráfica del comportamiento para las diferentes horas del día, estas graficas se encuentran en el Anexo B.

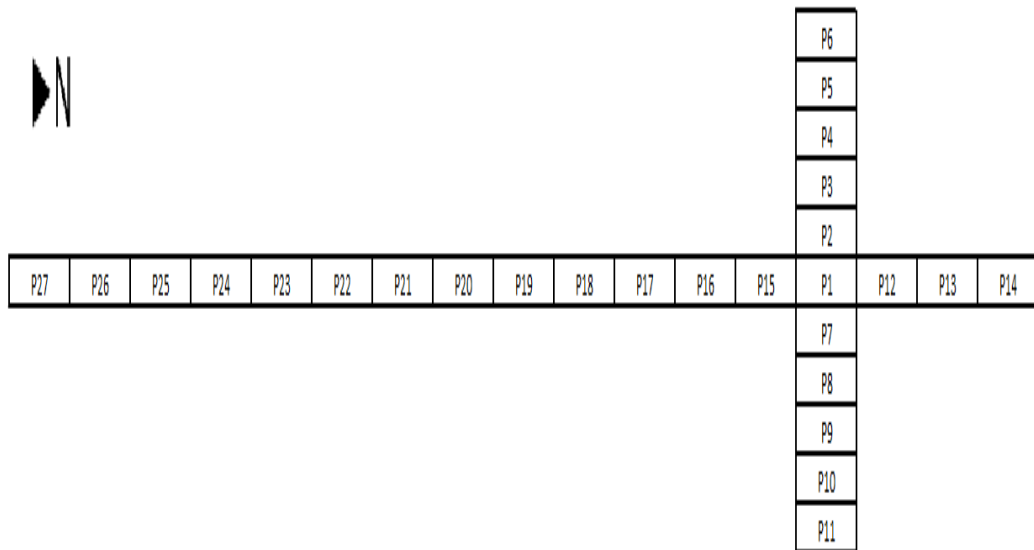
**Figura 14. Curvas del Df aportadas por el tubo central, por mediciones.**



La Figura 15 muestra el enmallado realizado para la caracterización del aporte del tubo solar ubicado en la parte norte del aula.

La Tabla 5 muestra los valores de radiación solar para este análisis.

**Figura 15. Modelo del enmallado de 27 puntos.**



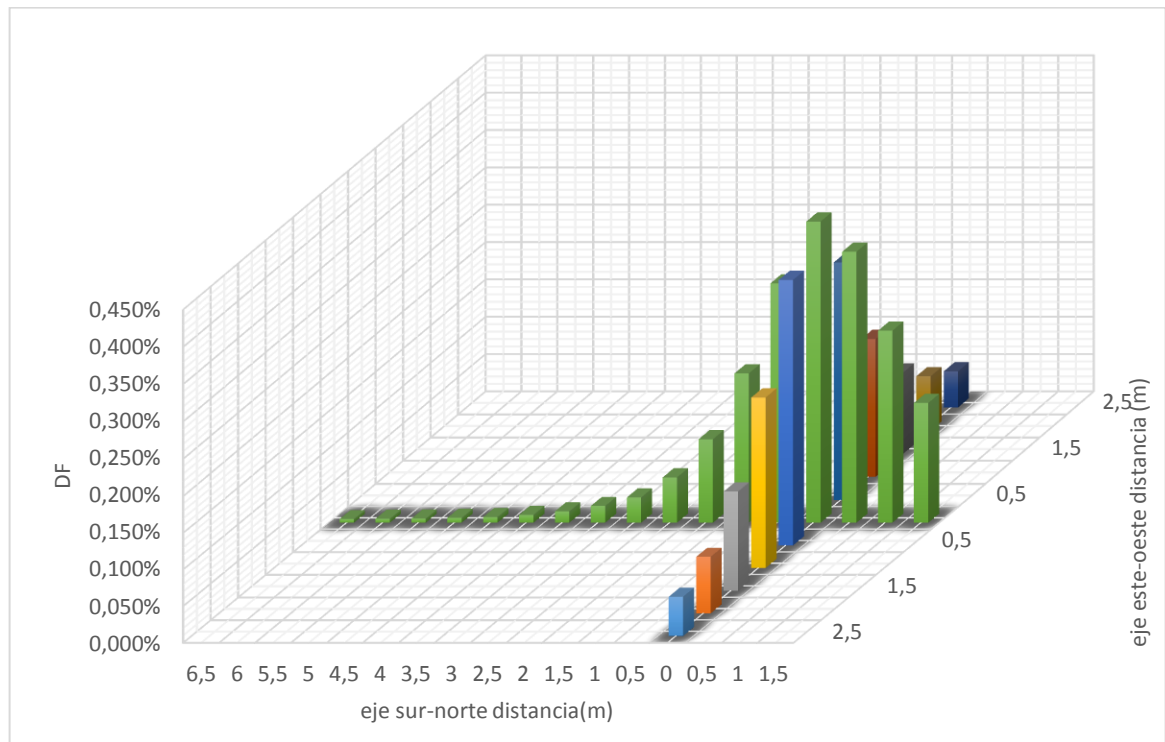
**Tabla 5. Valores de radiación solar tubo norte enmallado 27 puntos.**

HORA	# DATOS	RADIACION[W/m <sup>2</sup> ]
11:00 am	324	658
12:00 m	324	736
1:00 pm	324	499
2:00 pm	108	526
3:00 pm	324	272
4:00 pm	324	115

La Figura 16 muestra un modelado en 3D del comportamiento del Df, aportado por el tubo solar de la parte norte del aula, para las 12:00 m.

La Tabla 6 muestra los valores del Df en cada uno de los puntos del enmallado correspondientes a la Figura 16.

**Figura 16. Comportamiento en 3D del Df aportado por el tubo solar de la parte norte del aula IE 402, para las 12:00 m.**

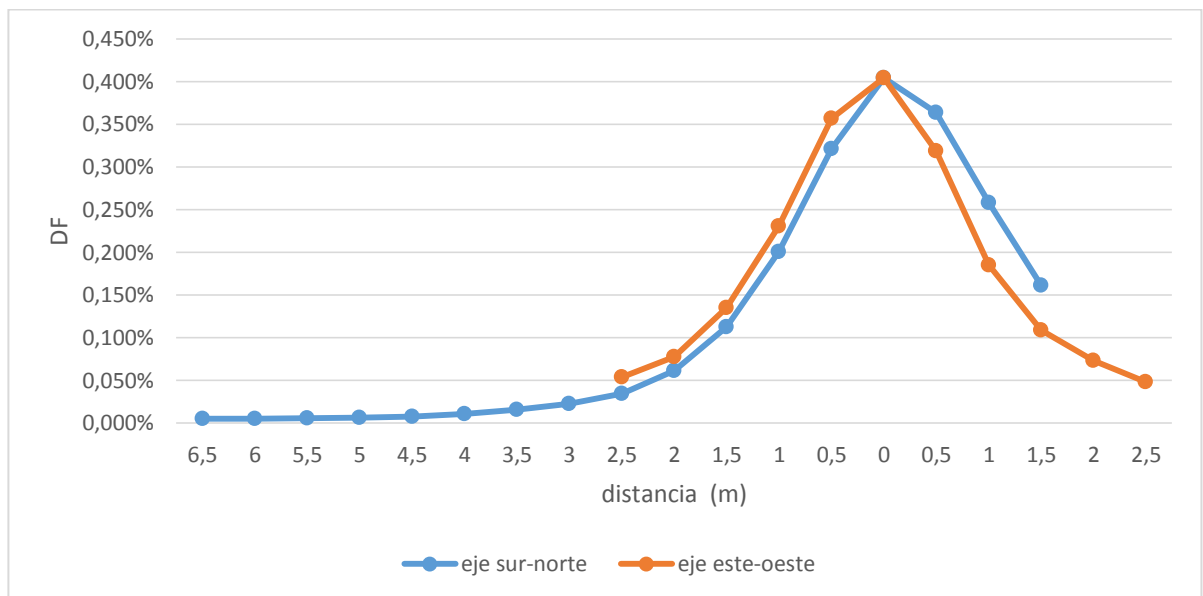


**Tabla 6. Df en cada punto del enmallado del tubo solar ubicado en la parte norte del aula, a las 12:00 m por medio de mediciones.**

Factor de luz diurna respecto a la incidencia en la terraza aula multipropósito							
punto	%Df	punto	%Df	Punto	%Df	punto	%Df
P1	0,404	P2	0,318	P3	0,185	P4	0,109
P5	0,073	P6	0,048	P7	0,357	P8	0,230
P9	0,135	P10	0,077	P11	0,054	P12	0,363
P13	0,258	P14	0,161	P15	0,321	P16	0,200
P17	0,112	P18	0,061	P19	0,034	P20	0,023
P21	0,015	P22	0,011	P23	0,008	P24	0,007
P25	0,006	P26	0,005	P27	0,005		

La Figura 17 muestra la curva del comportamiento del Df en los ejes norte-sur y oriente-occidente.

**Figura 17. Curvas del Df aportadas por el tubo norte, por mediciones.**



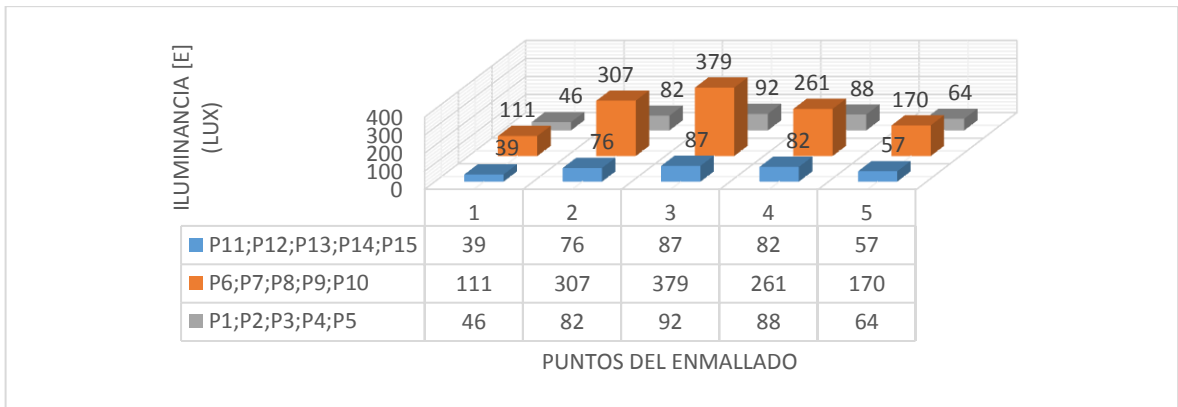
## 2.6 CARACTERIZACIÓN DE LA ILUMINANCIA (E) APORTADA POR LOS TRES TUBOS SOLARES

Para la medición de la iluminancia en el Aula Multipropósito IE 402 aportada por los tres tubos solares, se realiza el procedimiento de medición sobre el enmallado de 15 puntos mostrado en la Figura 9.

## Curvas de iluminancia en el Aula Multipropósito IE 402

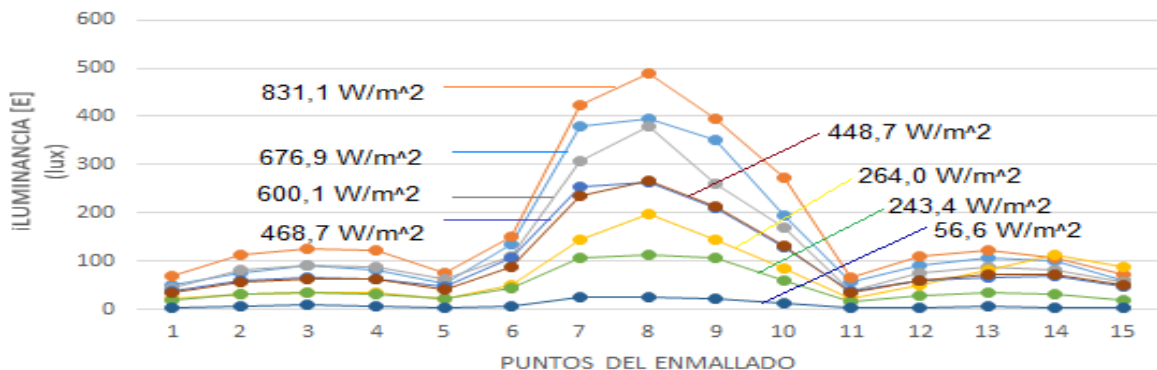
La Figura 18 muestra la forma en que los tubos solares al medio día distribuyen la iluminancia (E) en el Aula IE 402. En los anexos se encuentra los otros resultados obtenidos de iluminancia.

**Figura 18. Comportamiento en 3D de la iluminancia (E) aportada por los tres tubos solares en el aula IE 402, para las 12:00 m.**



La Figura 19 detalla el comportamiento de la iluminancia en el Aula Multipropósito durante cada hora del día en las que se realizaron las mediciones pertinentes, cada curva está acompañada de su valor correspondiente de radiación solar medido en la terraza del edificio.

**Figura 19. Curvas del comportamiento de la iluminancia (E) hora-hora en el aula IE 402 aportadas por los tres tubos solares.**



## 2.7 CARACTERIZACIÓN DE LA ILUMINANCIA (E) APORTADA POR CADA TUBO SOLAR DEL AULA IE 402

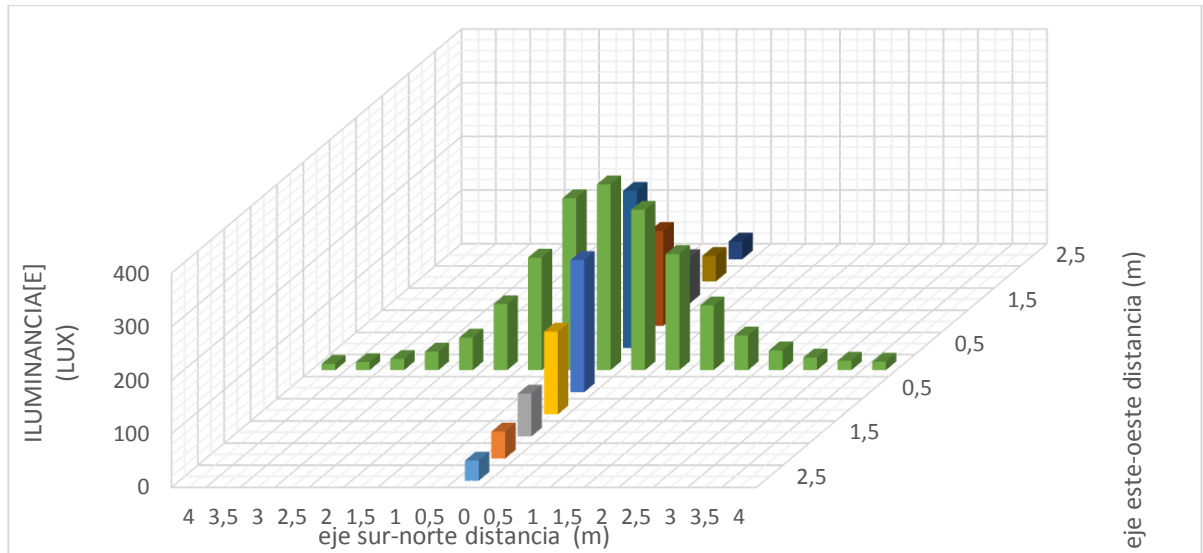
Las mediciones realizadas para la obtención de los resultados del aporte de iluminancia de cada uno de los tubos solares en el Aula IE 402, se hicieron sobre los enmallados de 27 puntos mostrados anteriormente en las figuras 12 y 15 respectivamente para los tubos ubicados en la parte centro y norte.

En la Figura 20 se puede apreciar que el comportamiento de la iluminancia aportada únicamente por el tubo solar ubicado en la parte central del Aula Multipropósito del Edificio de Ingeniería Eléctrica IE 402 es de forma exponencial decreciente, lo cual indica que a medida que la distancia va incrementando, el valor de E ira disminuyendo, lo cual se puede verificar con la Figura 21. La Tabla 7 muestra la información equivalente al valor de la iluminancia en cada uno de los puntos correspondientes a la Figura 20. De igual manera se realiza el gráfico del comportamiento para las diferentes horas del día, estas gráficas se presentan en el Anexo D.

**Tabla 7. E (lx) en cada punto del enmallado para el tubo solar ubicado en la parte central del aula, a las 12:00 m por medio de mediciones.**

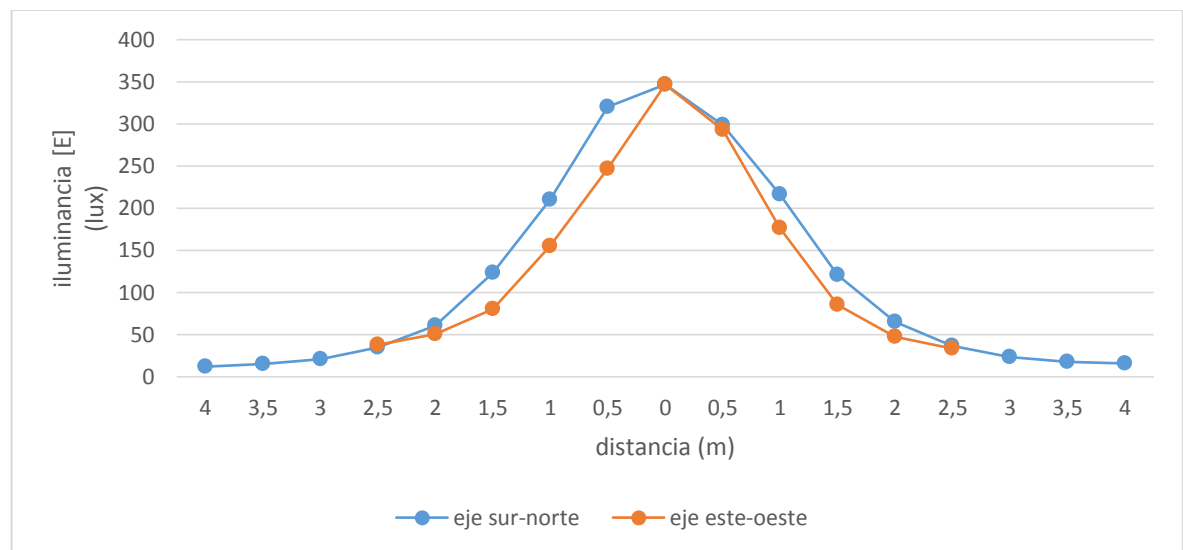
									33								
									48								
									85								
									177								
									293								
12	15	21	35	61	123	210	320	346	299	217	121	65	37	24	18	16	
									247								
									155								
									80								
									51								
									38								

**Figura 20. Comportamiento en 3D de la iluminancia (E), aportada por el tubo solar de la parte central del aula IE 402, para las 12:00 m.**



**La Figura 21 muestra las curvas del comportamiento de la iluminancia en el eje norte-sur y en el eje este-oeste, aportadas por el tubo solar central del Aula IE 402.**

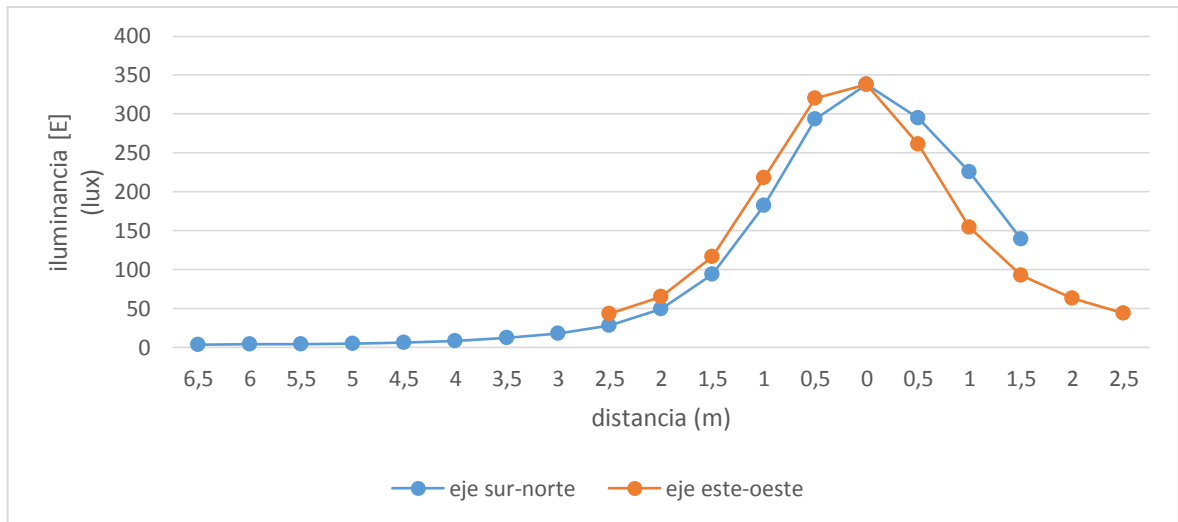
**Figura 21. Curvas de la iluminancia (E) aportadas por el tubo centro, por medio de mediciones.**





La Figura 23 muestra el comportamiento decreciente de las curvas de iluminancia en los ejes norte-sur y este-oeste obtenidas en las mediciones para el aporte lumínico del tubo ubicado en la parte norte del Aula IE 402.

Figura 23. Curvas de la iluminancia (E) aportadas por el tubo norte, por medio de mediciones.



### **3. COMPORTAMIENTO LUMÍNICO APORTADO POR LOS TUBOS SOLARES POR SIMULACIONES EN DIALUX.**

Este capítulo presenta las simulaciones realizadas mediante el uso de la herramienta computacional DIALux con el fin de ver el aporte lumínico de los tubos solares en el Aula Multipropósito del Edificio de Ingeniería Eléctrica (IE 402).

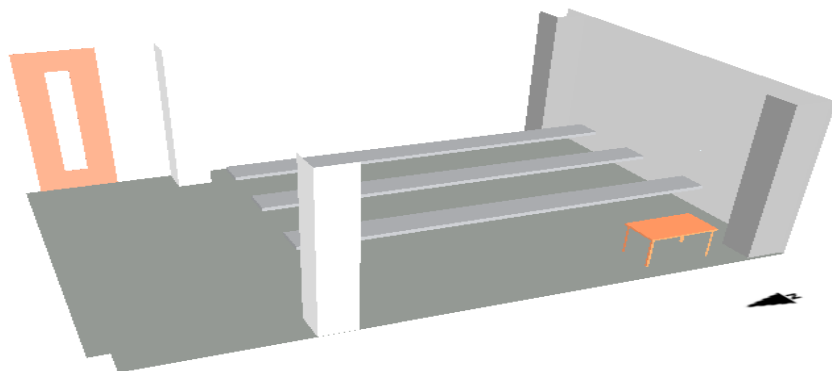
#### **3.1 MODELO VIRTUAL**

Para efectos de este trabajo de grado el modelo virtual se tomó del trabajo de grado “Caracterización de la iluminación en los espacios interiores del Edificio de Ingeniería Eléctrica” [13], culminado en el año 2015.

##### **3.1.1 Modelado del interior del aula IE 402**

Como se mencionó, el modelo virtual fue realizado en un trabajo de grado previo. Sin embargo, se hicieron las siguientes modificaciones: aislar el aula, se le quitaron los ventanales y se suprimió la disposición de luminarias artificiales dejando solo los tubos solares como medio de iluminación como se indica en la Figura 24.

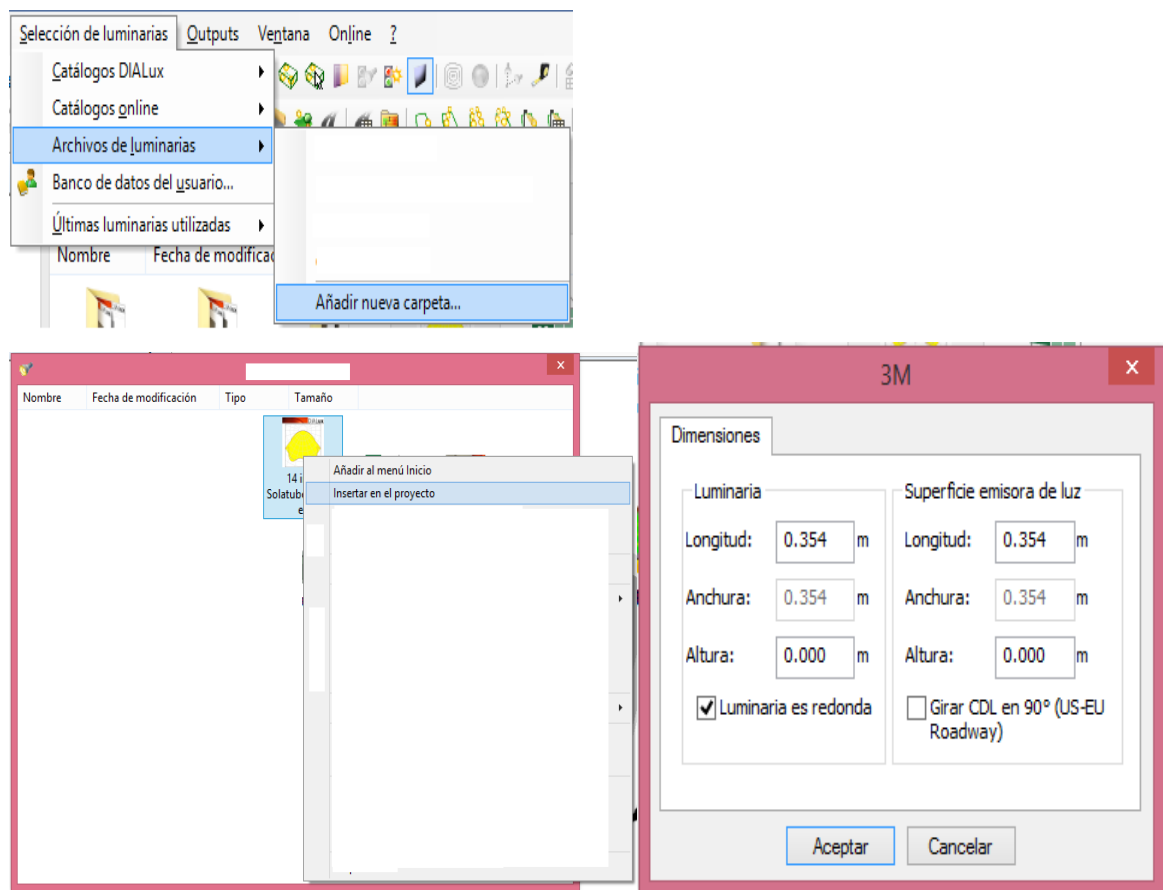
Figura 24. Geometría interior del aula IE 402.



### 3.1.2 Inserción de los tubos solares

La Figura 25 muestra las características de los tubos solares, las cuales se almacenan en DIALux mediante la barra de menú/ Selección de luminarias/ Archivos de luminarias/ Nueva carpeta. Se almacenan las curvas IES<sup>4</sup> del modelo del tubo solar a utilizar y a continuación dando clic derecho y seleccionando la opción “Insertar” en el proyecto. Seguidamente se especifica que el tubo solar es de forma circular y luego se selecciona Aceptar.

**Figura 25. Inserción de los tubos solares en DIALux.**

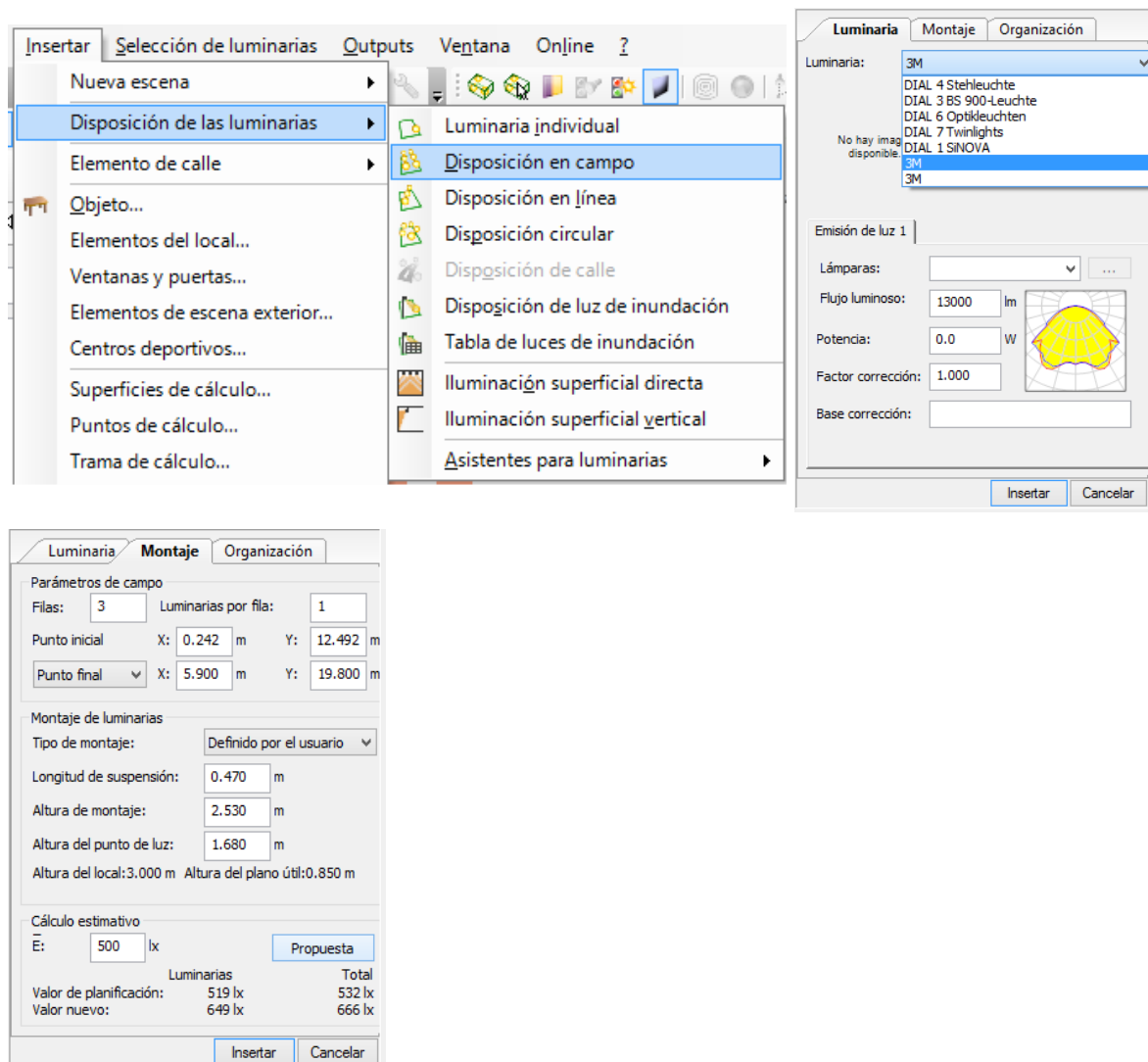


<sup>4</sup> Formato de archivo creado por la Illuminating Engineering Society con la finalidad de estandarizar la transferencia electrónica de datos fotométricos. En dicho formato se establece la secuencia en la que los datos fotométricos deben ser colocados. Un archivo IES es un archivo de texto que describe la intensidad de un origen de luz en puntos de una rejilla esférica.

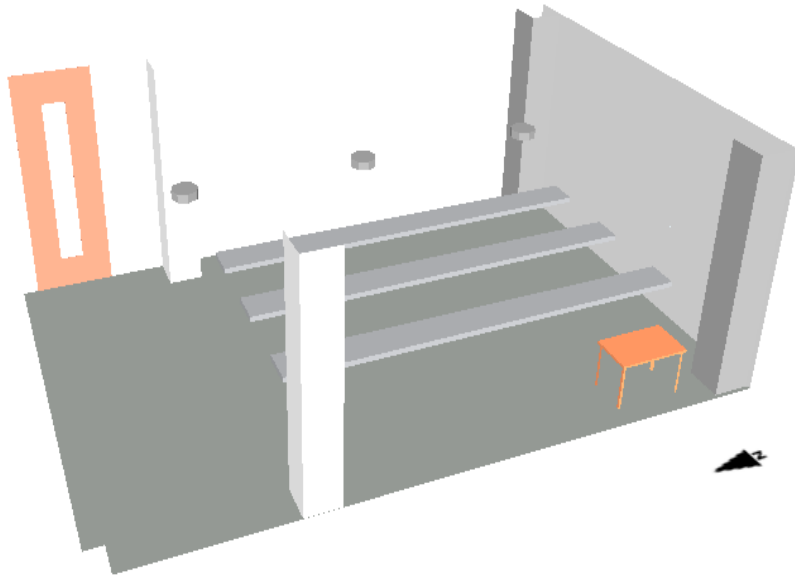
## Disposición y montaje de los tubos solares en el aula IE 402

En la barra de Menú/ insertar/ Disposición de las luminarias/ Disposición en campo, se selecciona el tubo ya almacenado previamente. Desplegando la pestaña de Luminaria se selecciona el tubo 3M, luego en montaje, parámetros de campo y montaje de luminarias se debe configurar la disposición de los tubos en el aula la cantidad, la altura de suspensión y la altura del montaje como se observa en la Figura 26. Luego se da en Insertar y los tubos solares se mostraran en el aula de la manera que muestra la Figura 27.

Figura 26. Disposición de los tubos solares en el Aula IE 402.



**Figura 27. Montaje de los tubos solares en el aula IE 402.**



### **3.1.3 Inserción de la trama de cálculo**

Las tramas de cálculo se pueden insertar por medio de la barra de menú, opción insertar o a través de la pestaña objetos del administrador de proyectos. DIALux permite utilizar tres tramas de cálculo diferenciadas por su forma (rectangular, radial y definida por el usuario). Debido a que DIALux es usado para comparar los valores medidos, las formas de tramas usadas fueron rectangular y definida por el usuario, también fueron necesarias tres tipos de tramas de cálculo; cada tipo obtendrá valores en luxes:

- El primero para el plano útil ubicado a 0,75 metro por encima del suelo del salón.
- El segundo para el plano del enmallado del tubo centro a 0,75 metros por encima del suelo del salón, el cual fue definido editando la trama de cálculo punto a punto con coordenadas.

- El tercero para el plano del enmallado del tubo norte a 0,75 metros por encima del suelo del salón el cual fue definido editando la trama de cálculo punto a punto con coordenadas.

### 3.2 METODOLOGÍA DE LA SIMULACIÓN

Para poder realizar el procedimiento de simulación y obtener los resultados arrojados por DIALux primero se realizó una serie de mediciones dentro del tubo solar y en la parte ligeramente después del difusor del mismo para poder caracterizar el flujo luminoso ( $\Phi$ ). Las mediciones se plasmaron simultáneamente con el valor de iluminancia en la terraza y se tomaron de la siguiente manera:

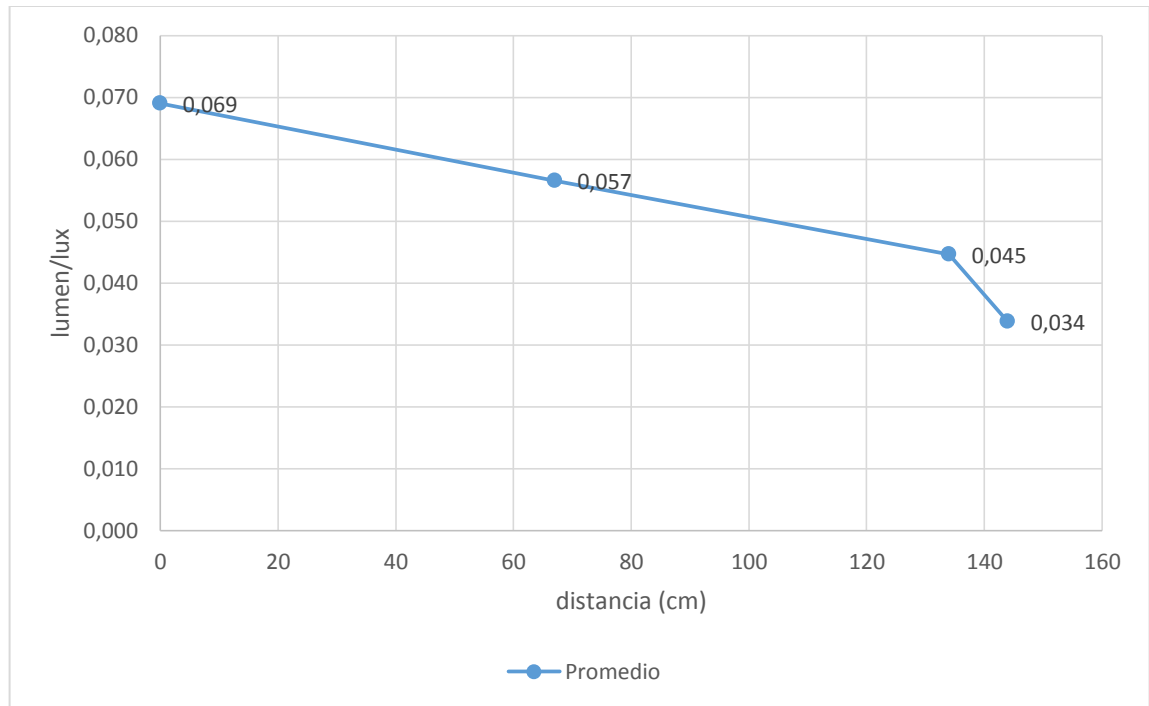
- Parte superior del tubo (0 cm).
- Parte media del tubo (67 cm).
- Parte inferior del tubo (134 cm).
- Después del difusor (144 cm).

Con el área transversal del tubo multiplicada por cada uno de los valores en lux medidos en las posiciones anteriormente descritas se obtendrá el flujo luminoso ( $\Phi$ ) el cual tiene como unidad de medida el lumen, y estos valores se dividen entre los valores de iluminancia tomados en la terraza para obtener una relación de lumen/lux y obtener la curva característica de la Figura 28. La Tabla 9 muestra la información correspondiente a la Figura 28.

**Tabla 9. Resultados a lo largo del tubo solar de la relación lumen/lux.**

PUNTO	Distancia (cm)	Promedio (lumen/lux)
PARTE SUPERIOR	0	0,069
PARTE MEDIA	67	0,057
PARTE INFERIOR	134	0,045
DESPUÉS DIFUSOR	144	0,034

**Figura 28. Curva de la relación lumen/lux a lo largo del tubo solar.**

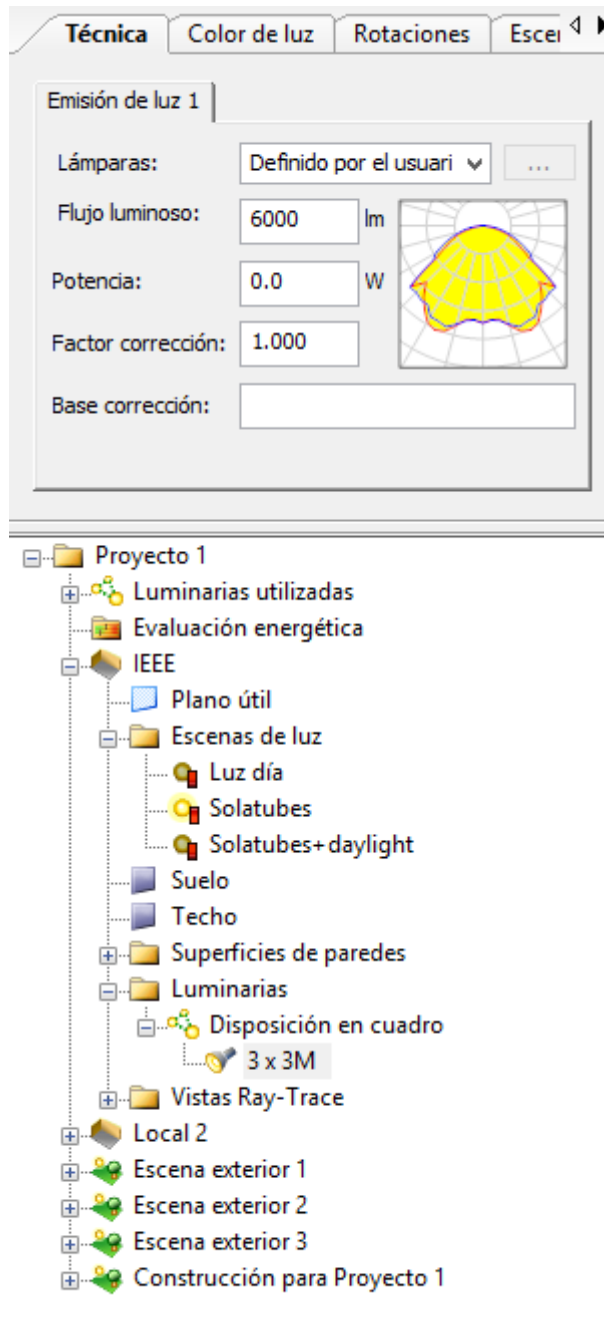


El anterior análisis se realizó con el fin de obtener la relación a lo largo del tubo pero el valor de gran interés para la simulación es el valor obtenido después del difusor (0,034 lumen/lux). Ya que al multiplicarlo por el valor de iluminancia en la terraza sin importar cuál sea, se calcula el flujo luminoso para ser insertado en DIALux.

Luego de realizar lo indicado anteriormente y haber insertado el tubo solar, se selecciona Luminarias/ Disposición en cuadro y aparece el lugar donde se debe ir variando el valor del Flujo Lumínico cada que se vaya a realizar una nueva simulación como se indica en la Figura 29.

Para iniciar la simulación se selecciona Outputs/ Iniciar calculo/ Aceptar.

**Figura 29. Inserción del flujo luminoso para cada simulación.**



Para efectos de esta parte del capítulo se tiene en cuenta que las simulaciones se realizan con el mismo tipo de enmallados mencionados e ilustrados en el Capítulo 2 (ver figuras 9, 12 y 15).

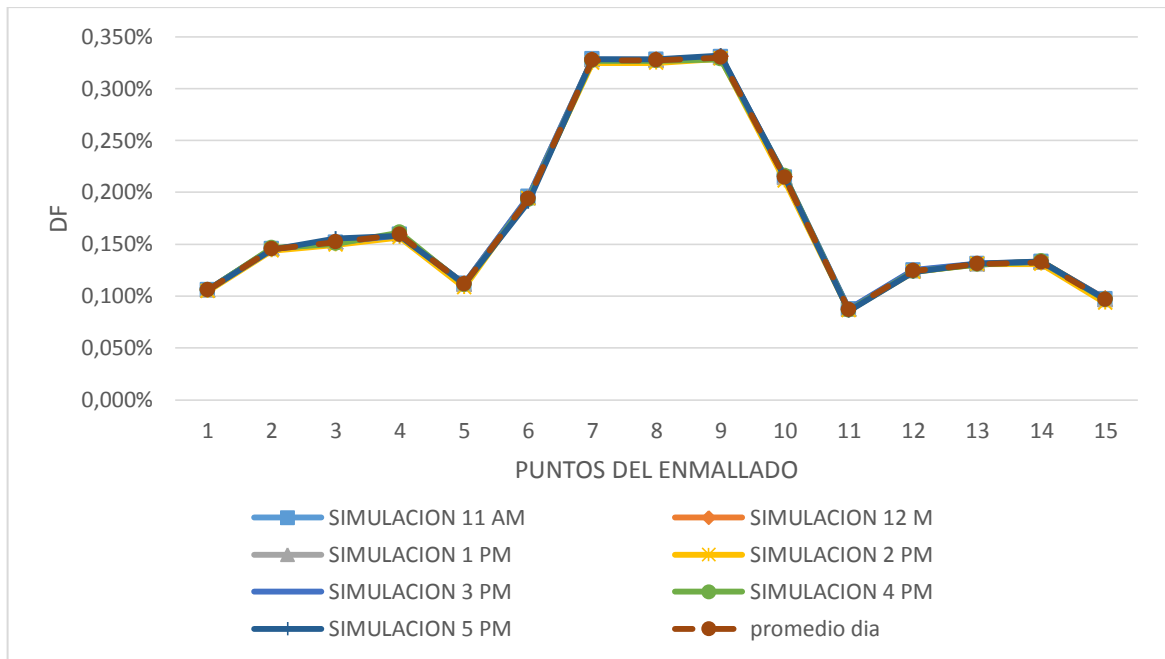
### 3.2.1 Caracterización del Df

Como resultado de las simulaciones realizadas en el software DIALux, se obtuvieron las curvas de comportamiento lumínico del Df por el aporte de los tubos solares, que se detallan a continuación. Si bien el análisis se hizo para cada hora, a continuación se detallan las curvas hora-hora y en el Anexo C se pueden encontrar las demás curvas.

La Figura 30 muestra las curvas para cada hora obtenidas en DIALux, estas curvas detallan una conducta idéntica en el comportamiento del Df a lo largo del día. Comportamiento en el cual el valor del Df es mayor en los puntos que se encuentran directamente bajos los tres tubos solares.

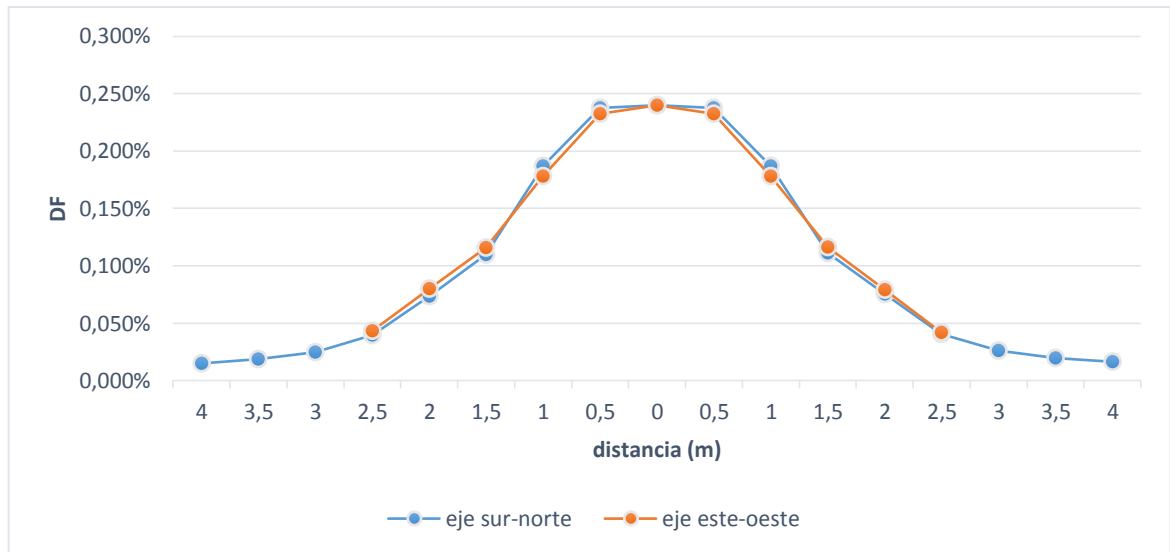
Al promediar los resultados de las curvas de la Figura 30 se obtiene una curva promedio representativa del Df para el aula IE 402.

**Figura 30. Curvas del comportamiento del Df hora-hora aportadas por los tres tubos en el aula IE 402.**

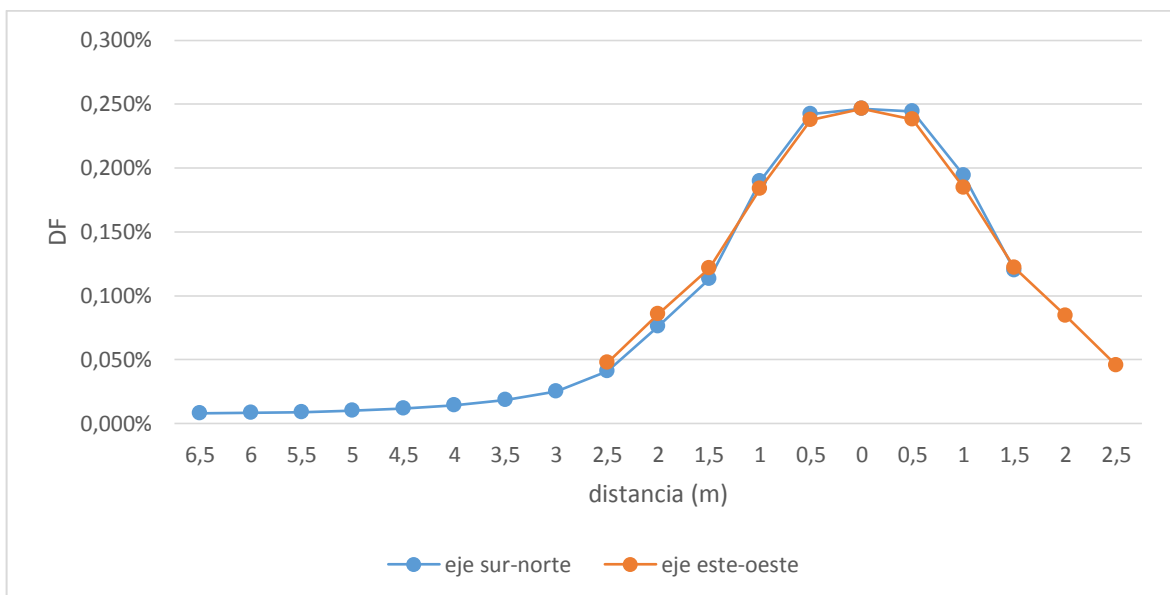


Las figuras 31 y 32 muestran las curvas del Df las cuales describen el comportamiento diario promedio en todos los puntos del lugar, aportadas por el tubo solar ubicado en la parte central y en la parte norte del aula IE 402, en el eje norte-sur y el eje este-oeste, según la radiación solar incidente en la terraza.

**Figura 31. Curvas de Df aportadas por el tubo central, por simulaciones.**



**Figura 32. Curvas de Df aportadas por el tubo norte, por simulaciones.**



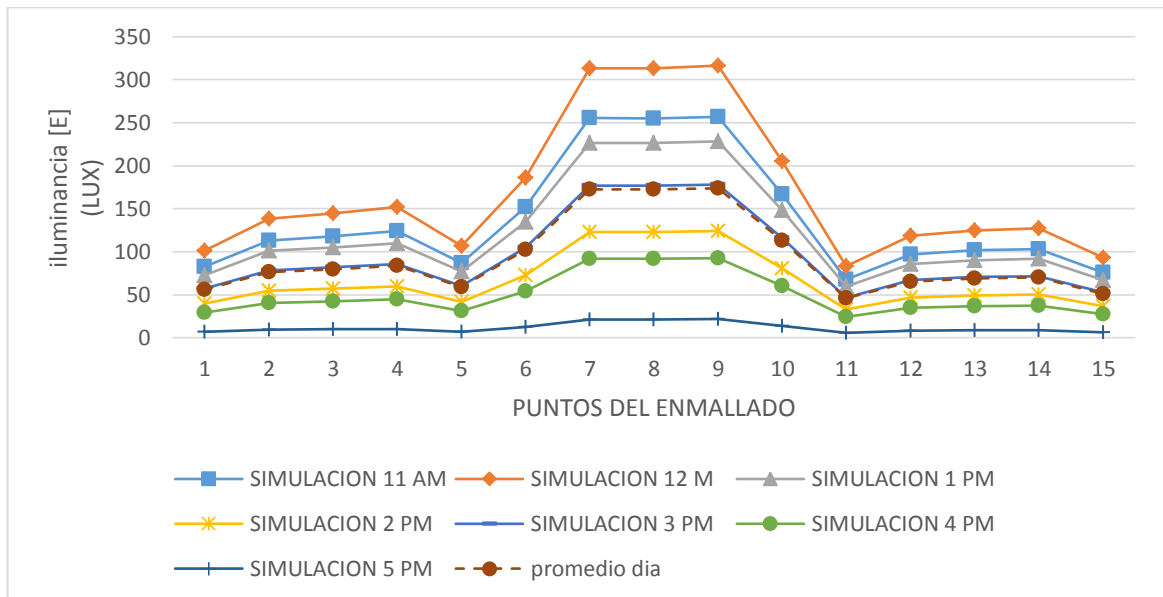
### 3.2.2 Caracterización de la iluminancia (E)

Las curvas del comportamiento lumínico de iluminancia (E) obtenidas en el proceso de simulación por medio del software DIALux, se detallan a continuación. El análisis se hizo para cada hora del día, en seguida se detallan algunas curvas representativas y en el Anexo E se pueden encontrar el resto de ellas.

Las curvas resultantes que se muestran en la Figura 33 detallan una conducta similar del comportamiento de iluminancia (E) respecto a la radiación solar incidente en la terraza durante el día. Se puede observar un comportamiento lógico en donde la iluminancia es mayor en los puntos directos a los tubos solares. También se puede observar que a medida que avanzan las horas, la iluminancia va disminuyendo.

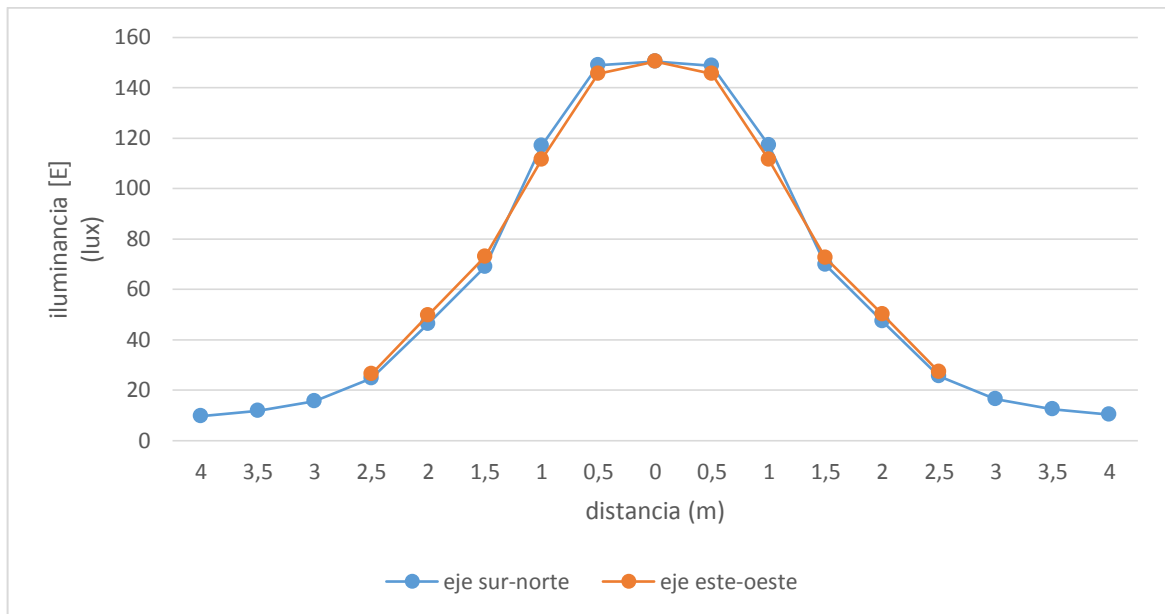
Al promediar los resultados de las curvas de la Figura 33 se obtiene una curva promedio representativa de la iluminancia para el aula IE 402.

**Figura 33. Curvas del comportamiento de la iluminancia (E) hora-hora aportadas por los tres tubos en el aula IE 402.**

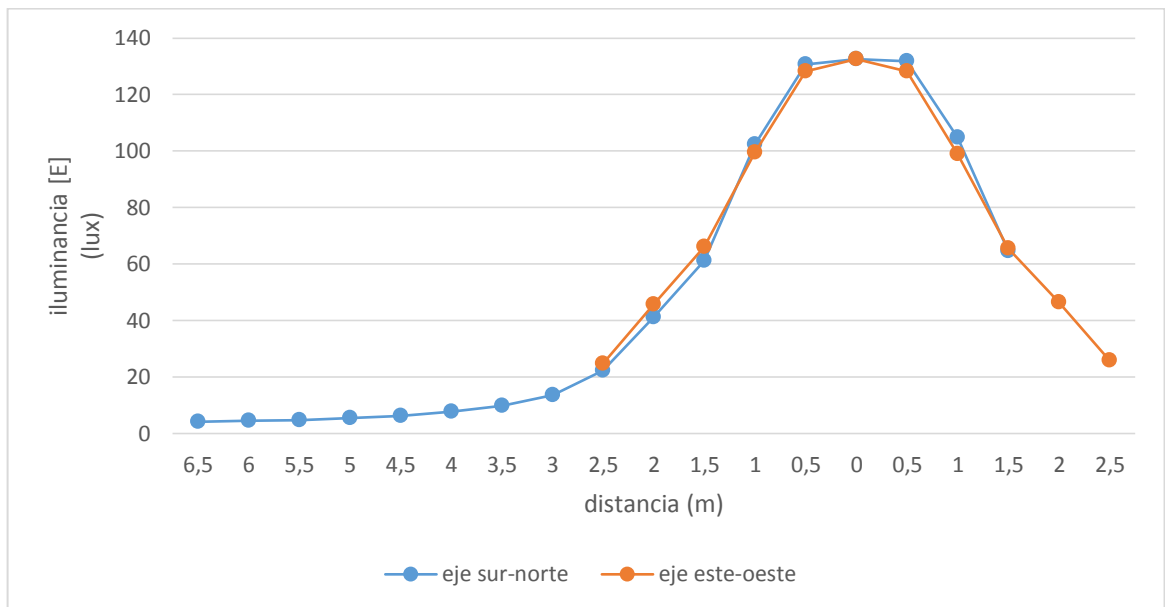


Las figuras 34 y 35 detallan el comportamiento de iluminancia (E) diaria promedio, en todos los puntos del Aula IE 402, aportada por el tubo solar ubicado en la parte central y norte.

**Figura 34. Curvas de E aportadas por el tubo central, por simulaciones.**



**Figura 35. Curvas de E aportadas por el tubo norte, por simulaciones.**



## **4. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE MEDICIONES Y SIMULACIONES**

Este capítulo presenta un análisis comparativo de los resultados obtenidos en las lecturas de las mediciones en los luxómetros digitales con las simulaciones realizadas en el software DIALux, para así poder establecer una relación y comparar qué tan cercanos están los datos medidos de los resultados de las simulaciones y viceversa.

### **4.1 ANÁLISIS DEL DF**

A continuación se realiza un análisis comparativo de los resultados de coeficientes de luz diurna (Df) o porcentajes de penetración obtenidos mediante simulación y medición.

La variación de los resultados obtenidos por medio de mediciones depende de la radiación solar, mientras que la variación de los resultados obtenidos en las simulaciones depende de la radiación solar y del flujo lumínico ( $\Phi$ ) hallado dentro del tubo solar.

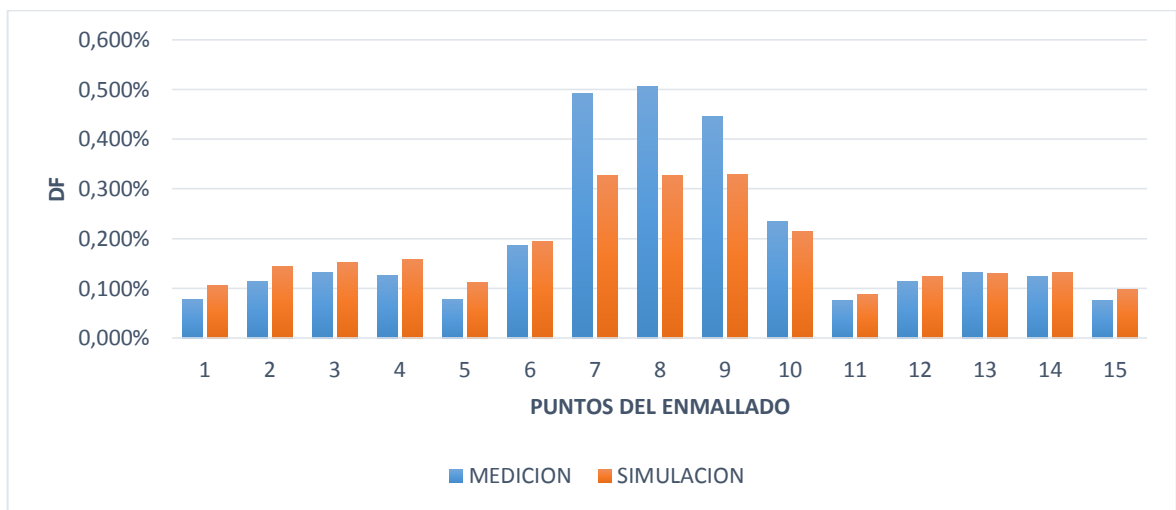
El análisis se realizó para Df y se examinaron los siguientes comportamientos: por hora, diario y promedio día.

Las figuras 36 y 37 son pertinentes para realizar el estudio por hora (11:00 am y 4:00 pm respectivamente). En estas gráficas se puede observar que sin importar la hora del día y por consiguiente el valor de radiación solar, existe una clara similitud en las tendencias del comportamiento de las curvas, incluso se puede observar que hay series que pueden llegar a coincidir. Es notorio que la curva resultante de la simulación en DIALux tiende a ser un poco más óptima en los

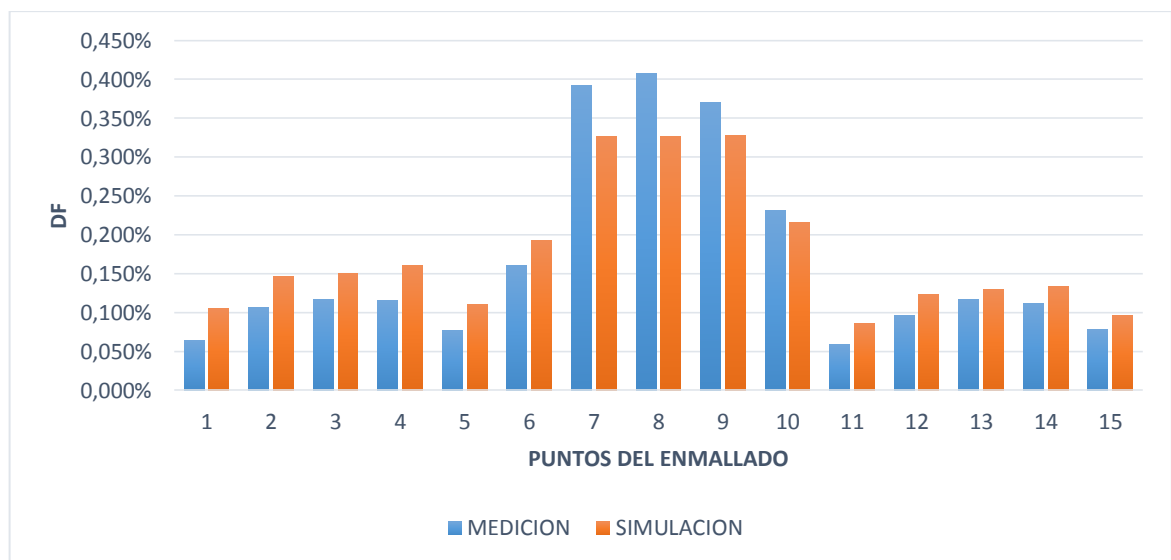
valores de cada uno de sus puntos, lo que nos indica, que los valores obtenidos en las simulaciones tienden a ser similares a los valores reales obtenidos en las mediciones, por lo cual el análisis es confiable.

En seguida se muestran las gráficas más representativas y en el Anexo F se presentan el resto de ellas.

**Figura 36. Comportamiento medido y simulado. Hora 11:00 am.**



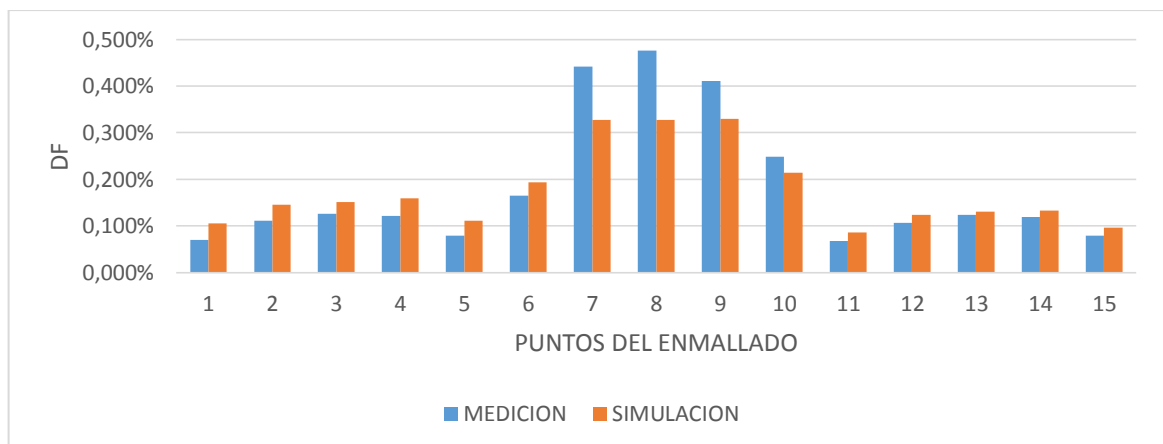
**Figura 37. Comportamiento medido y simulado. Hora 4:00 pm.**



Para el análisis del comportamiento del Df diario se observan las curvas obtenidas para cada una de las horas del día mostradas en la Figura 11 las cuales son las curvas obtenidas en el procedimiento de medición y en la Figura 30 las curvas obtenidas en el procedimiento de simulación, presentadas en los capítulos 2 y 3 respectivamente. Las cuales muestran que DIALux sin importar la hora, la variación en el comportamiento de las curvas será nula, mientras que en las mediciones se pueden apreciar cambios en las magnitudes de los valores en algunos puntos del enmallado, esto ocurre porque DIALux mantiene una relación constante en la relación de la iluminancia. Sin embargo, y a pesar de los cambios en las mediciones reales los valores obtenidos no difieren sustancialmente y las curvas tanto de mediciones como de simulaciones son similares.

El último estudio a realizar para el coeficiente de luz diurna, es el de promedio diario, el cual se describe en la Figura 38. Figura en la que se observa que en los resultados obtenidos en las mediciones se alcanza un valor pico máximo mayor al obtenido en las simulaciones, esto sucede porque DIALux realiza un modelo más óptimo del aporte lumínico de los tubos en el aula. Sin embargo, también es notorio que tanto la curva simulada como la curva de valores reales de Df tienen un comportamiento de forma uniforme, lo cual hace que los resultados sean verídicos y confiables.

**Figura 38. Comportamiento promedio diario.**

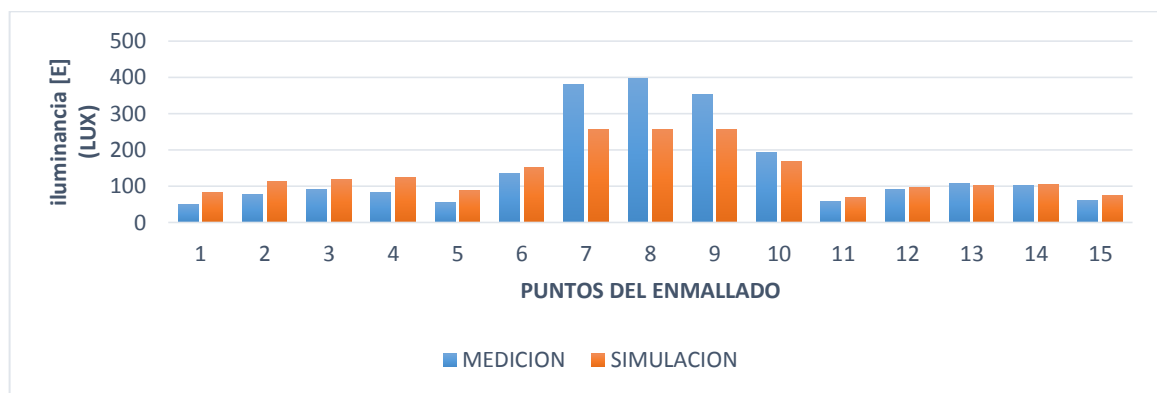


## 4.2 ANÁLISIS DE LA ILUMINANCIA

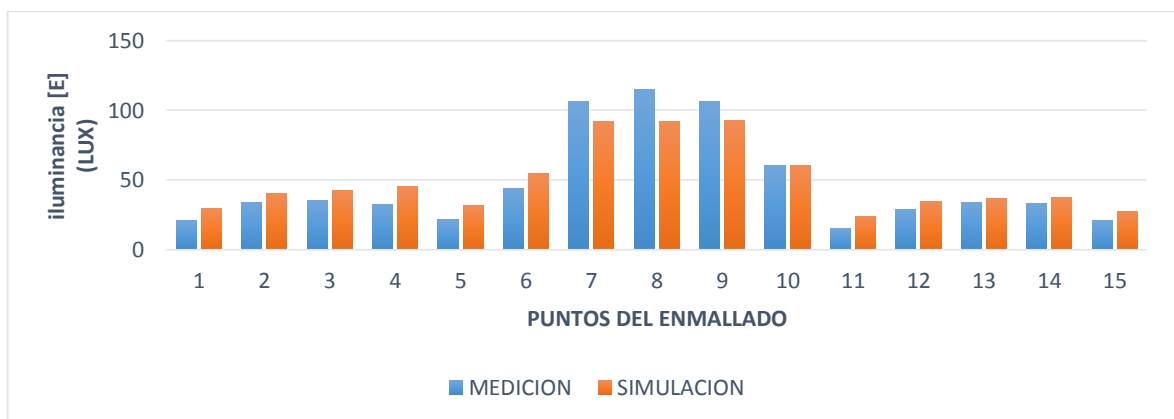
A continuación se compara para cada hora del día los resultados de iluminancia (E) obtenidos mediante simulación y medición, con el fin de observar las diferencias o similitudes en la distribución lumínica dentro del aula. En este análisis se tendrán en cuenta los mismos comportamientos examinados en el análisis comparativo del Df.

Las figuras 39 y 40 son usadas para realizar el estudio por hora; a continuación se muestran los resultados más representativos y en el Anexo G se pueden encontrar el resto de ellos.

**Figura 39. Comportamiento medido y simulado. Hora 11:00 am.**



**Figura 40. Comportamiento medido y simulado. Hora 4:00 pm.**

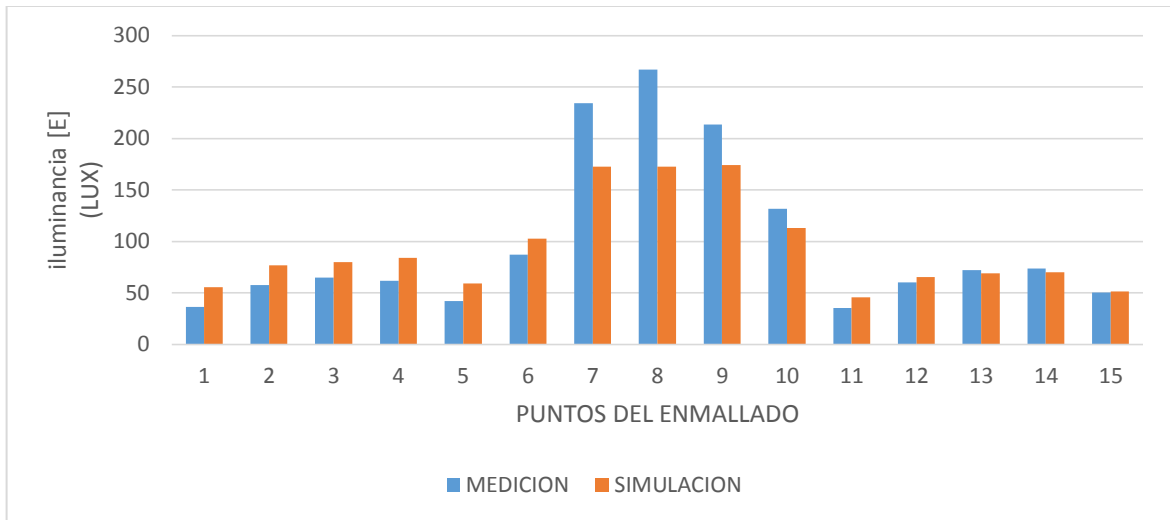


La comparación realizada en las figuras 39 y 40 muestran que hay una similitud en las tendencias de las curvas. Es notorio que la curva resultante de la simulación en DIALux tiende a ser más óptima en los valores de sus puntos, lo que nos indica que tienden a ser muy similares a los valores reales, además de esto a medida que la radiación disminuye, la iluminancia obtenida va disminuyendo, lo que hace más verídico el decir que presentan un mismo comportamiento.

El estudio del comportamiento diario está basado en la obtención de las curvas para cada una de las horas del día, resultados que se pueden observar en las figuras 19 y 33 realizadas por medio de medición y simulación presentadas en los Capítulo 2 y Capítulo 3 respectivamente. Figuras que muestran que a medida que la radiación solar va disminuyendo la iluminancia de igual manera va reduciéndose, este efecto ocurre tanto para las curvas obtenidas en las mediciones como en las simulaciones, lo cual indica que la comparación de estas curvas da un resultado confiable gracias a su similitud.

El último estudio a realizar de iluminancia (E) es para el promedio diario, el cual se describe en la Figura 41, figura que se deriva de promediar los resultados obtenidos hora-hora durante todo el día y plasmar este promedio en una gráfica. La Figura 41 muestra que tanto la curva simulada como la curva de valores reales comparten el mismo comportamiento de distribución lumínica dentro del Aula IE 402. Los resultados obtenidos por la simulación en el software DIALux son similares y cercanos a los valores medidos, inclusive llegan a existir valores que coinciden exactamente, lo cual indica que los resultados obtenidos generan confianza a la hora de realizar este tipo de análisis.

**Figura 41. Comportamiento promedio diario.**



### **4.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE USAR DIALUX**

A continuación se enuncian las principales características de DIALux:

#### **Ventajas:**

- Especialista en simulación de luz artificial.
- Acceso a catálogos: Philips, Sylvania, Toshiba, Osram entre otros.
- Permite simular luz diurna en espacios internos y externos.
- Modela todo tipo de obstrucción como árboles y edificios aledaños.
- Permite especificar la altitud del espacio simulado con respecto al suelo.
- Tiene tres tipos de cielos: cielo cubierto, cielo despejado y cielo parcialmente nublado.
- Se puede definir la longitud, latitud y zona horaria de la ubicación del local [22] [24].

#### **Desventajas:**

- Según la cantidad de detalles tomados en consideración la iluminación natural podría tomar tiempos de cálculos extensos, aproximadamente 2 horas.

- Imposibilidad de crear un suelo inclinado.
- No realiza el procesamiento del aporte lumínico que puede proceder del inicio o final de una escalera que conduce de un nivel a otro.
- Inconveniente al considerar en los cálculos los tubos solares, debido a que realiza la estimación sin tomar en consideración la radiación horizontal, es decir que ni softwares como DIALux en sus herramientas tienen la opción directa para que la iluminancia del tubo solar varíe de acuerdo a la radiación solar. Sin embargo esto se realiza de manera indirecta con la inclusión del valor del flujo luminoso ( $\Phi$ ) en cada simulación.

## 5. CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo plasman las principales conclusiones del trabajo de grado, se hacen algunas observaciones y se dan algunas recomendaciones para la continuación de trabajos de grado en esta línea.

### 5.1 CONCLUSIONES

- Se observó que tanto para los resultados en DIALux como para los resultados obtenidos en las mediciones para el comportamiento de la curva de  $D_f$  y el comportamiento de la curva de iluminancia (E) del Aula Multipropósito (IE 402) tienen la misma tendencia y un comportamiento uniforme.
- Se observó en el estudio del aporte lumínico de un solo tubo solar independientemente de cual sea, que el comportamiento tanto del  $D_f$  como de la iluminancia (E) es del tipo exponencial decreciente siendo el punto máximo el directo al tubo solar y disminuyendo a medida que se aleja de este.
- Se apreció que por medio de DIALux se obtienen curvas características más optimas pero de igual manera cercanas a las curvas obtenidas midiendo. Se debe tener en cuenta en el inciso presente la importancia de tener equipos de medición con incertidumbres adecuadas para poder realizar las medidas y que las comparaciones sean válidas.
- Se observó que el software DIALux no cuenta con la opción de implementar los tubos solares como tal, sino que deben ser insertados como si fueran una luminaria del tipo luz artificial.

- Finalmente los autores consideran que la realización de este trabajo de grado les ha permitido consolidar su formación en aspectos como: desarrollo de investigación, trabajo en equipo, análisis de procedimientos de medición y elaboración de documentos técnicos.

## **5.2 OBSERVACIONES**

- Las horas en las que se realizaron mediciones solo pudieron ser a partir de las 11:00 am debido a la disponibilidad horaria del aula IE 402 y a la disponibilidad académica de los estudiantes autores de este trabajo de grado.
- Los valores de radiación varían en cada análisis de cada enmallado ya que a pesar de estar en la misma hora están medidos en diferentes instantes y además de esto la cantidad de datos tomados varían y no son la misma cantidad
- Las mediciones realizadas en el enmallado de 27 puntos, en el cual se trabajó solo con un tubo solar ya sea el tubo centro o el tubo del lado norte, solo se pudieron realizar hasta antes de las 5:00 pm, ya que a esta hora la radiación es muy baja (aproximadamente menor a  $150 \text{ W/m}^2$  lo cual hace que el luxómetro digital ubicado en el aula no registre ningún valor de iluminancia.

## **5.3 RECOMENDACIONES**

- Realizar futuros trabajos de grado que aborden la medición del espacio nuevamente de forma intensa durante todo un año, para apreciar si existen cambios significativos debidos al mes del año.
- Actualizar los parámetros de la puerta, paredes, techo, piso y todos los elementos internos del modelo virtual, en el momento de utilizar este modelo

para nuevos estudios de iluminación, debido a que las características de estos pueden cambiar.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PATTINI Andrea. Luz natural e iluminación de interiores. [Online]. Available: <http://www1.herrera.unt.edu.ar/faceyt/dllyv/files/2011/06/cap11.pdf>  
[Accessed: 04-Feb-2015].

[2] ACEVEDO César Ing. Electricista, M. Sc. Esp. Gerencia Recursos Energético. “Energía, Recursos energéticos y desarrollo sostenible” Notas de clase Energía y medio ambiente. Universidad Industrial de Santander. Disponible en: bibliografía personal.

[3] FRADES Alicia. Universidad Politécnica de Madrid. “Optimización energética en viviendas unifamiliares mediante sistemas de aporte de luz natural”. Subdirección de investigación y posgrado 2011. [Online]. Available: [http://oa.upm.es/9885/1/TESIS\\_MASTER\\_ALICIA\\_FRADES\\_SANZ.pdf](http://oa.upm.es/9885/1/TESIS_MASTER_ALICIA_FRADES_SANZ.pdf)  
[Accessed: 04-Feb-2015].

[4] ELSEVIER. Energy Conversion and Management. A Zain-Ahmed, K Sopian, M.Y.H Othman, A.A.M Sayigh, P.N Surendran. Daylighting as a passive solar Design strategy in tropical buildings: a case study of Malaysia September de 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890401000073>.  
[Accessed: 12-Abr-2015].

[5] G.A.O. Pinto, “Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el edificio eléctrica II de la universidad industrial de Santander”, Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2011.

[6] Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica Universidad Nacional de Colombia, "Alumbrado interior residenciales", Bogotá D.C. Poligrama, 2007.

[7] Inova Chile, CORFO, << Manual de Diseño Pasivo y Eficiencia Energética en Edificios Públicos, >> Sociedad Impresora R&R Ltda., Santiago de Chile, 2012.

[8] Comité Español de Iluminación (CEI), Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA), Consejo Superior de los colegios Arquitectos de España (CSCAE) , "Guía técnica para el aprovechamiento de la Luz Natural en la Iluminación de edificios", Madrid: IDEA, 2005.

[9] Ministerio de ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Bogotá D.C. Aincol (textos), 2011.

[10] Ministerio de Minas y Energía, <<"Reglamento Técnico de Instalaciones eléctricas-RETIE", >> Bogotá D.C., 2013.

[11] S. Roger, «slideshare,» "Instituto Universitario Politécnico Santiago Mariño extensión Guayana", 1 Junio 2009. [Online]. Available: <http://www.slideshare.net/iupsmpzo/uso-eficiente-y-racional-de-la-energa-elctrica>. [Accessed: 20-Sep-2015].

[12] Colegio Claret. Espectro electromagnético. [Online]. Available: [http://www.concursoespacial.com/tematicoLaTierra2\\_1.asp](http://www.concursoespacial.com/tematicoLaTierra2_1.asp) [Accessed: 20-Sep-2015].

[13] Diego Andrés Galvis Neira, Carlos Andrés Expósito Cáceres. Caracterización de la iluminación en los espacios interiores del Edificio de Ingeniería Eléctrica. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. 2015. Director: German Alfonso Osma Pinto.

- [14] VILORIA José. “Estudio de la Viabilidad de Instalaciones Solares. Determinación del Potencial Solar.” Madrid, España, p. 34, 2012.
- [15] MACIAS Ana, ANDRADE Jaime. “Estudio de generación bajo escenarios de cambio climático,” Bogotá, Colombia, 2014.
- [16] AIP Colombia, “Tablas de salida y puesta del sol año 2014,” Colombia, 2014.
- [17] E. d. T. d. e. e. S.A, «hidromet,» Empresa de Transmision de energia Electrica S.A, 2009. [Online]. Available: [http://www.hidromet.com.pa/brillo\\_solar.php](http://www.hidromet.com.pa/brillo_solar.php)  
[Accessed: 17-Sep-2015].
- [18] L. Lesur, Manual de iluminación: una guía paso a paso, México D.F.: Trillas, 2009.
- [19] Ministerio de Minas y Energía, <<“Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público-RETILAP”, >> Bogotá D.C., 2010.
- [20] SARMIENTO Pedro. *Energía solar en arquitectura y construcción*, 2nd ed. México DC: RIL Editores, 2007.
- [21] GECSA INGENIERIA Y OBRAS S.A. Espacio solar tecnología bioclimática. [Online]. Available: <http://espaciosolar.com/>  
[Accessed: 17-Sep-2015].
- [22] Urbanismo.com. Unifamiliares. Gonzalo Sánchez del pozo. Enero 28. [Online]. Available: <http://www.urbanismo.com/unifamiliares/>.  
[Accessed: 20-Sep-2015].
- [23] EBERHARDT Oliver. “THE COMPARISON OF NATURAL AND ARTIFICIAL LIGHTING.” IEEE, p. 2, 2009.

[24] Lechner, Norbert. (2004). "Heating, Cooling, and Lighting: Design Methods for Architects". 2<sup>nd</sup> Ed. John Wiley & Sons, Inc. Printed in the United States of America.

[25] Dr. en Arq. Carlos Alberto Fuentes Pérez, Dr. en Arq. Julio Gerardo Lorenzo Palomera, Mgtr. Arq. Judith del Carmen Garcés Carrillo. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Campus Tampico-México. Adaptabilidad de la vivienda al clima. Emplazamiento armónico con el entorno tropical. [Online]. Available: [http://www.academia.edu/10036021/Adaptabilidad\\_de\\_la\\_vivienda\\_al\\_clima\\_Emplazamiento\\_arm%C3%B3nico\\_con\\_el\\_entorno\\_tropical](http://www.academia.edu/10036021/Adaptabilidad_de_la_vivienda_al_clima_Emplazamiento_arm%C3%B3nico_con_el_entorno_tropical). [Accessed: 15-Oct-2015].

[26] Slideshare. Clima tropical. 8 Noviembre 2012. [Online]. Available: <http://es.slideshare.net/cosasdeclase/clima-tropical-15084690> [Accessed: 15-Oct-2015].

[27] Clima tropical. 1 Mayo 2013. [Online]. Available: [http://es.wikipedia.org/wiki/Clima\\_tropical](http://es.wikipedia.org/wiki/Clima_tropical) [Accessed: 15-Oct-2015].

[28] Yaik-Wah Lima, Mohd Hamdan Ahmad, Dilshan Remaz Ossen Internal Shading for Efficient Tropical Daylighting in Malaysian Contemporary High-Rise Open Plan Office. Faculty of Built Environment, Universiti Teknologi Malaysia, Johor DT, Malaysia, Institute Sultan Iskandar of Urban Habitat and Highrise, Universiti Teknologi Malaysia, Johor DT, Malaysia. 9 September 2012. [Online]. Available: <http://ibe.sagepub.com/content/22/6/932.short>. [Accessed: 15-Oct-2015].

[29] GONZALES Diana. Iluminación natural interior de edificios. Available: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia57/HTML/Articulo06.htm>. [Accessed: 17-Sep-2015].

[30] REHABILITACIONES HERCULES S.A. “Ahorro de energía eléctrica: ductos solares,”. [Online]. Available: <http://rehabilitacioneshercules.blogspot.com/2011/02/como-ahorrar-energia-electrica-tubos-de.html> [Accessed: 17-Sep-2015].

[31] Diego Alberto Luis Rincón Flórez. Diseño del sistema de iluminación basados en tubos reflectantes para el ultimo nivel de la reformación del edificio de la E3T. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. Director Manuel José Ortiz Rangel

[32] GARCIA Alfonso, REYES María. “La Importancia de la Estimación de la Incertidumbre en las Mediciones y la Validación de las Hojas de Cálculo.” Durango, México, pp. 1–2, 2012.

[33] ELECTRICASD. Que es la iluminancia. 10 de Octubre de 2014. [Online]. Available: <https://www.google.com.co/search?q=ILUMINANCIA&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwiE2M62mfXJAhUBUiYKHZcTBDEQsAQIJw&biw=1366&bih=667#imgrc=wY1PZgLnZ2bqaM%3A>. [Accessed: 24-Dic-2015].

## BIBLIOGRAFÍA

Diego Alberto Luis Rincón Flórez. Diseño del sistema de iluminación basados en tubos reflectantes para el ultimo nivel de la reformación del edificio de la E3T. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. Director Manuel José Ortiz Rangel

Diego Andrés Galvis Neira, Carlos Andrés Expósito Cáceres. Caracterización de la iluminación en los espacios interiores del Edificio de Ingeniería Eléctrica. Trabajo de Grado. Universidad Industrial de Santander. 2015. Director: German Alfonso Osma Pinto.

GONZALES Diana. Iluminación natural interior de edificios. Available: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/Energia/Energia57/HTML/Articulo06.htm>. [Accessed: 17-Sep-2015].

Ministerio de Minas y Energía, <<"Reglamento Técnico de Instalaciones eléctricas-RETIE", >> Bogotá D.C., 2013.

Ministerio de Minas y Energía, <<"Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público-RETILAP", >> Bogotá D.C., 2010.

PATTINI Andrea. Luz natural e iluminación de interiores. [Online]. Available: <http://www1.herrera.unt.edu.ar/faceyt/dllyv/files/2011/06/cap11.pdf> [Accessed: 04-Feb-2015].

## ANEXOS

### ANEXO A: CONCEPTOS ILUMINACIÓN

A continuación se presentan conceptos generales a tener en cuenta para la iluminación de interiores:

Flujo luminoso: cantidad de luz emitida por una fuente luminosa. Su unidad es el lumen.

Intensidad luminosa: se define como la cantidad de flujo luminoso, propagándose en una dirección dada, que atraviesa o incide sobre una superficie por unidad de ángulo sólido<sup>5</sup>. Su unida es la candela (cd).

Iluminación o Iluminancia: flujo luminoso que incide sobre una superficie. Su unidad el lux

1 lux=1 lumen por metro cuadrado

1 lux= 0.093 pie-candelas (pie).

1 pie-candela=10.8 luxes (o lúmenes por metro cuadrado)

$$Iluminancia = intensidad / (distancia)^2$$

Rendimiento luminoso: mide la cantidad de energía que se transforma en luz en relación con la energía total consumida. Su unidad es el lumen por watts (lm/w)

Luminancia: cantidad de luz que incide en una superficie y que es reflejada. Esta propiedad permite que los objetos sean visibles al ojo, debido a que las

---

<sup>5</sup> Angulo solido: se define como el ángulo especial que abarca un objeto visto desde un punto dado, que corresponde con la zona del espacio limitada por una superficie cónica. Mide el tamaño aparente de ese objeto.

transformaciones por absorción de los mismos, proporcionan una percepción de brillo. La unidad básica de luminancia o brillo es el pie-lambert.

1 pie-lambert=3.43 candelas por metro cuadrado

Reflectancia: se define como la relación entre el flujo luminoso reflejado (luminancia) y el flujo luminoso incidente (iluminancia).

$$Reflectancia = \frac{luminancia}{iluminancia}$$

Reflexividad: es el porcentaje de luz o flujo luminoso incidente que es reflejado por una superficie.

Visibilidad: definida como la claridad con las que los seres humanos pueden ver.

Importancia de los colores: los colores juegan un papel importante en las reflexividades. Los colores también tienen una significación psicológica y emocional. A continuación se presenta una tabla que muestra las reflexividades de los colores o acabados más usados:

Color o acabado	% de luz reflejada	Color o acabado	% de luz reflejada
Blanco	85	Gris oscuro	30
Crema claro	75	Rojo oscuro	13
Gris claro	75	Café oscuro	10
Amarillo claro	75	Azul oscuro	8
Verde claro	65	Verde oscuro	7
Azul claro	65	Madera mediano	63
Amarillo medio	65	Madera satinada	34
Gris medio	55	Concreto	55
Verde medio	52	Cartón	30
Azul medio	35	Negro	5

## EFFECTOS DE LA MALA ILUMINACION EN LA SALUD DE LAS PERSONAS

Los principales efectos sobre las personas que realizan un trabajo en lugares mal iluminados son:

1. Pérdida de la agudeza visual: es la consecuencia de un esfuerzo para percepción visual que exige determinada tarea.
2. Fatiga ocular: consecuencia de permanecer confinado a un lugar con iluminación no adecuada.
3. Deslumbramiento: debido a brillos excesivos en por parte de las fuentes luminosas.
4. Rendimiento visual: debido a falta de iluminación uniforme, se presenta extenuación del sistema nervioso central.
5. Fatiga muscular: debido a que se adoptan posiciones inadecuadas para logra realizar las actividades.

## ANEXO B. CURVAS DE COMPORTAMIENTO LUMÍNICO DEL DF (MEDICIONES)

Usar la luz natural como fuente de iluminación de tareas en el entorno de trabajo o incluso en el interior de viviendas requiere de estudios previos para manejar esta fuente de luz cambiante. Este anexo presenta todas las curvas de comportamiento lumínico obtenidas por medio de mediciones, enfatizados en el aporte lumínico de los tubos solares en el aula multipropósito del Edificio de Ingeniería Eléctrica de la UIS.

### Curvas características aportadas por los tres tubos solares en el aula multipropósito IE 402

El comportamiento de la luz diurna dentro del aula multipropósito IE 402, aportada por los tubos solares, respecto a la incidencia solar en la terraza, se representa mediante el conjunto de Tablas y Figuras que se presentan a continuación, las cuales se describen mediante el Df (daylight factor) en función de la distancia horizontal.

Figura B.1. Representación 3D, Df, aula IE 402, 11:00 AM, respecto a la radiación en la terraza.

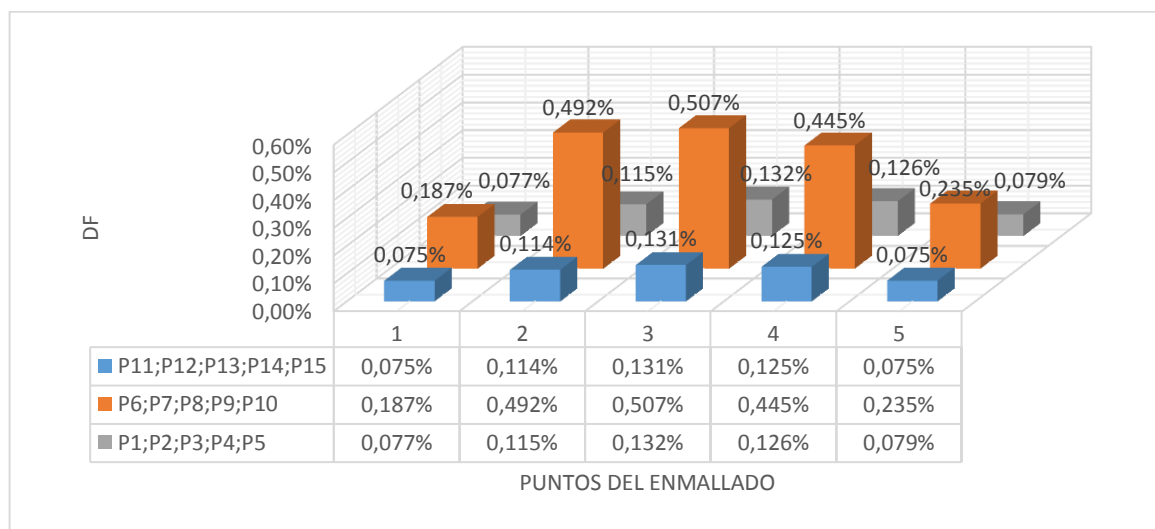


Figura B.2. Representación 3D, Df, aula IE 402, 1:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

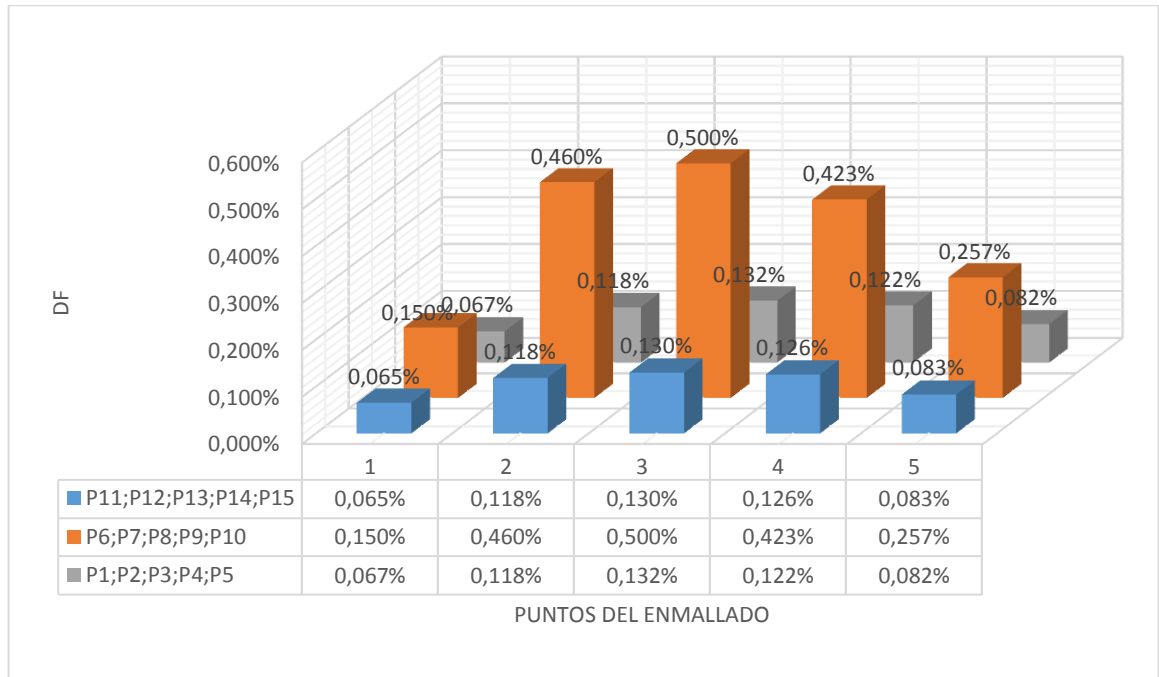


Figura B.3. Representación 3D, Df, aula IE 402, 2:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

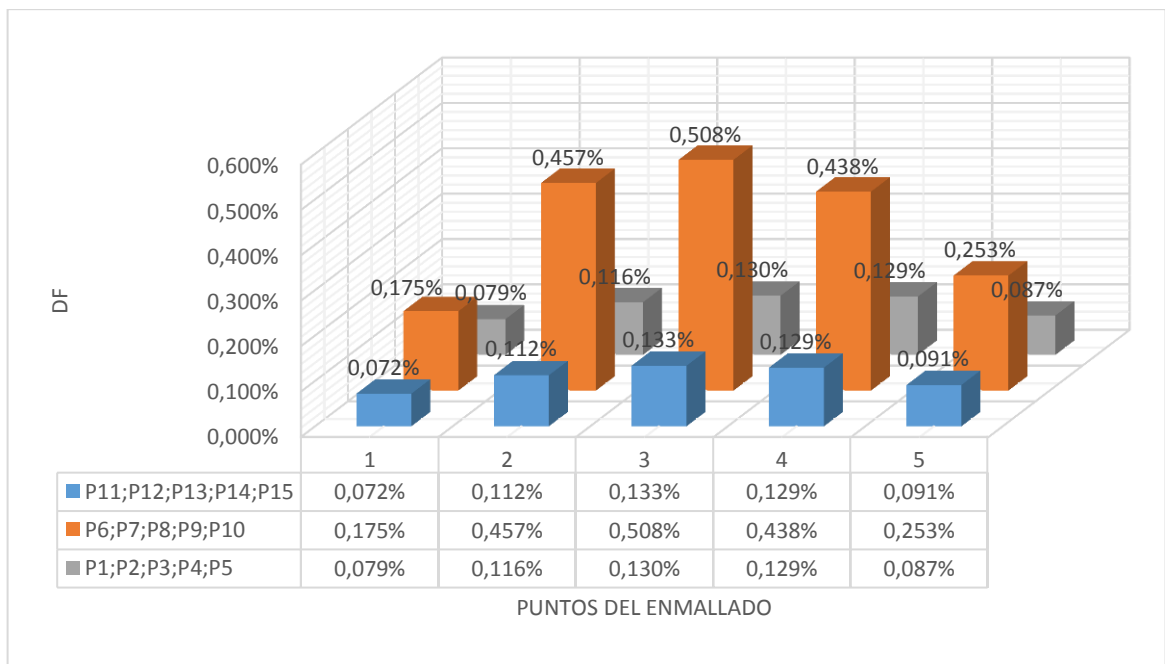


Figura B.4. Representación 3D, Df, aula IE 402, 3:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

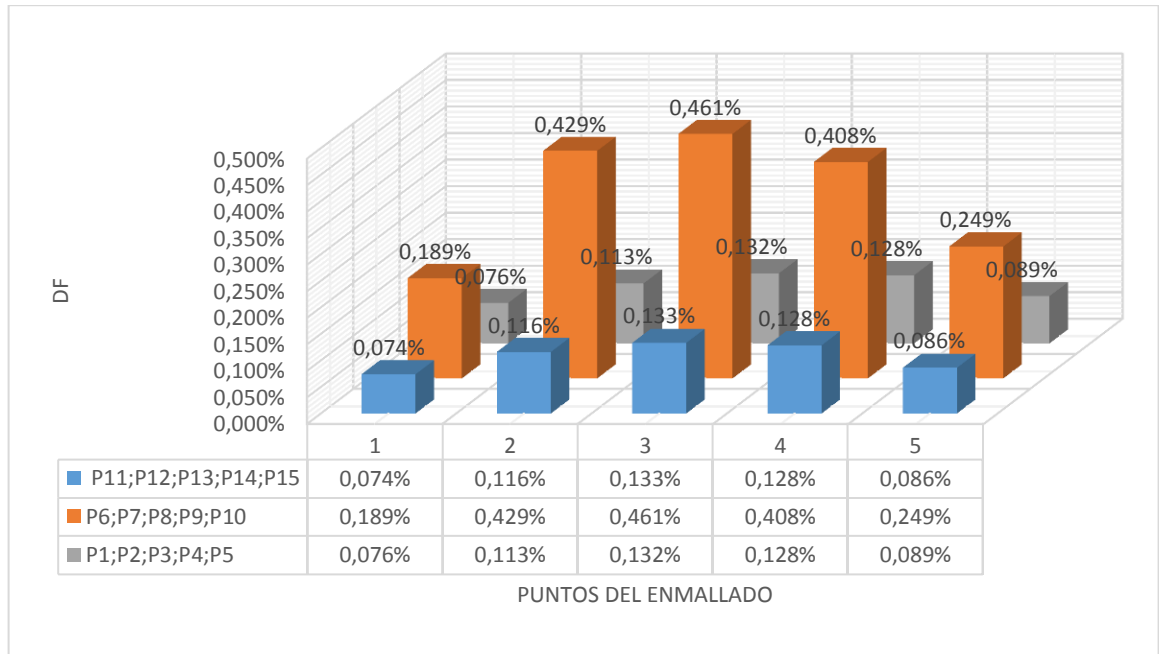


Figura B.5. Representación 3D, Df, aula IE 402, 4:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

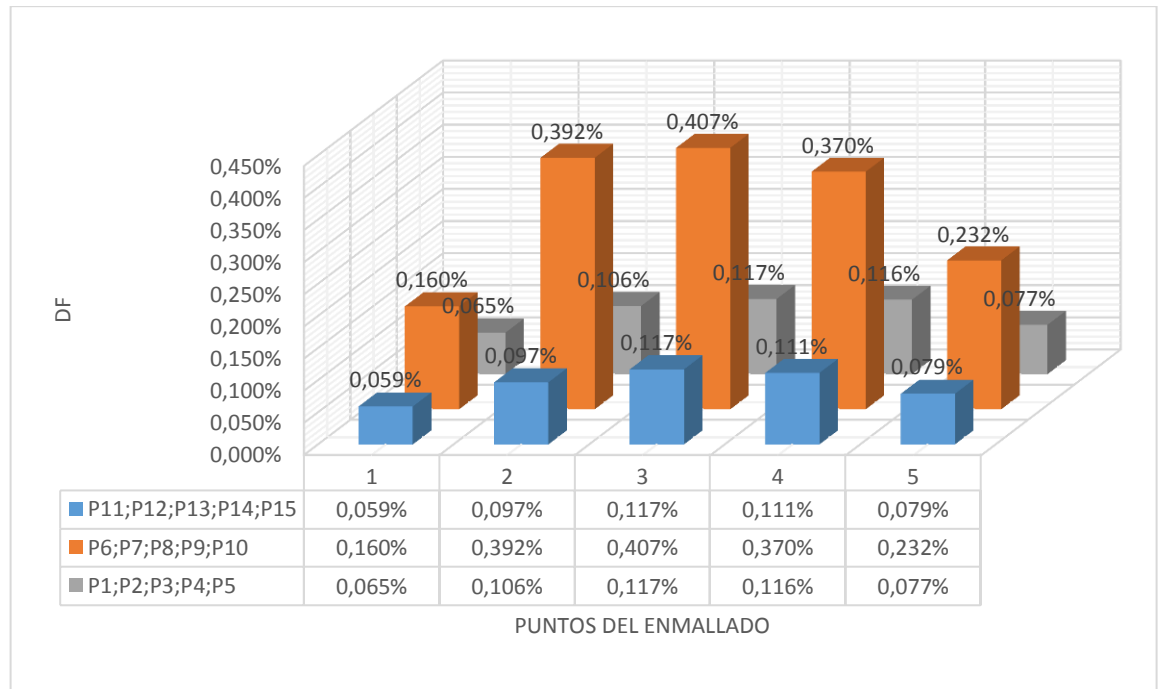
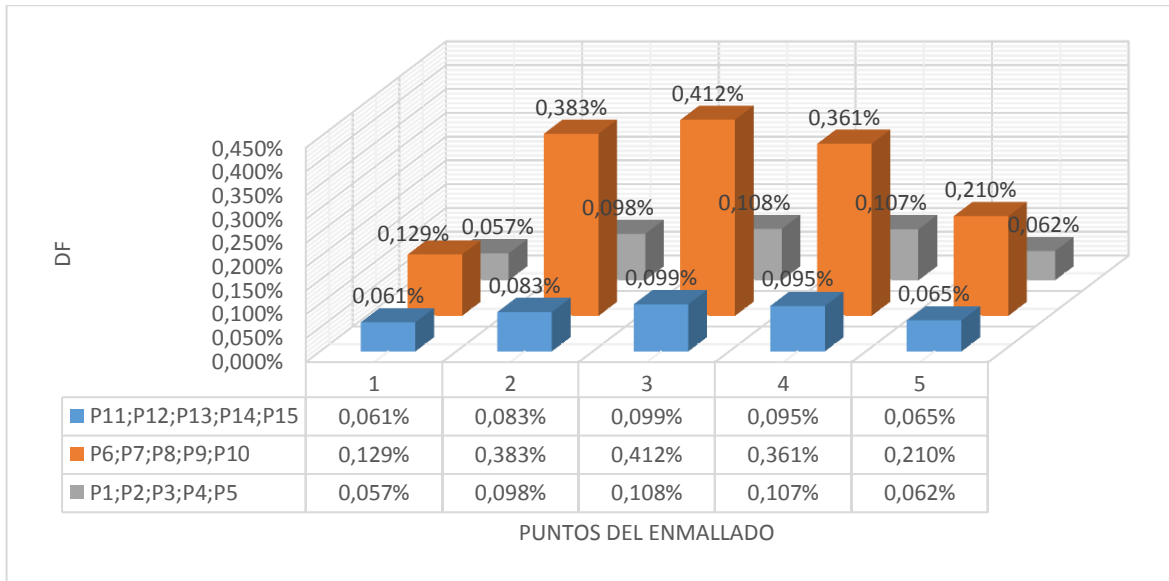


Figura B.6. Representación 3D, Df, aula IE 402, 5:00 PM, respecto a la radiación en la terraza



**Curvas características aportadas por el tubo solar ubicado en la parte central del aula multipropósito IE 402**

Figura B.7. Representación 3D, Df, aula IE 402, 11:00 AM, respecto a la radiación en la terraza

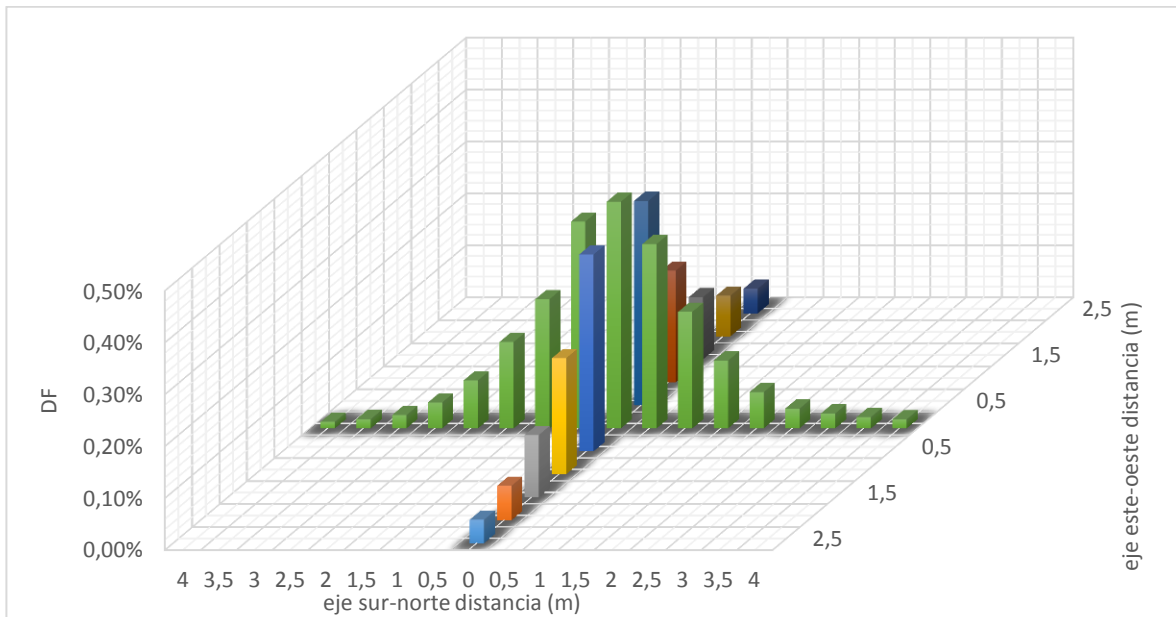


Figura B.8. Representación 3D, Df, aula IE 402, 1:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

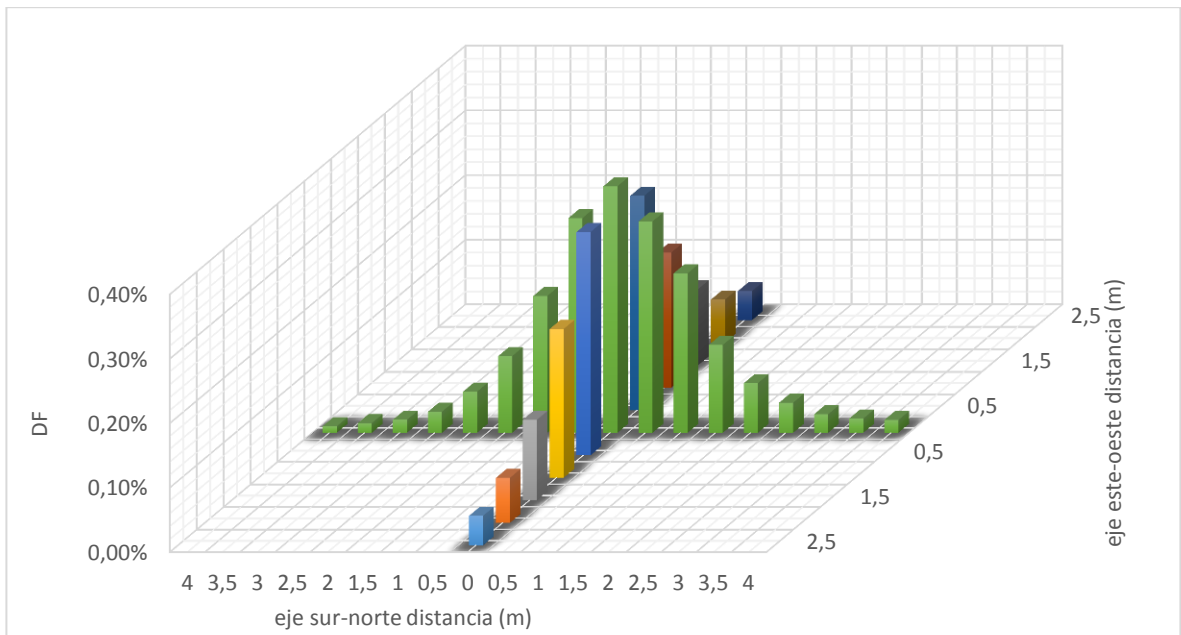


Figura B.9. Representación 3D, Df, aula IE 402, 2:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

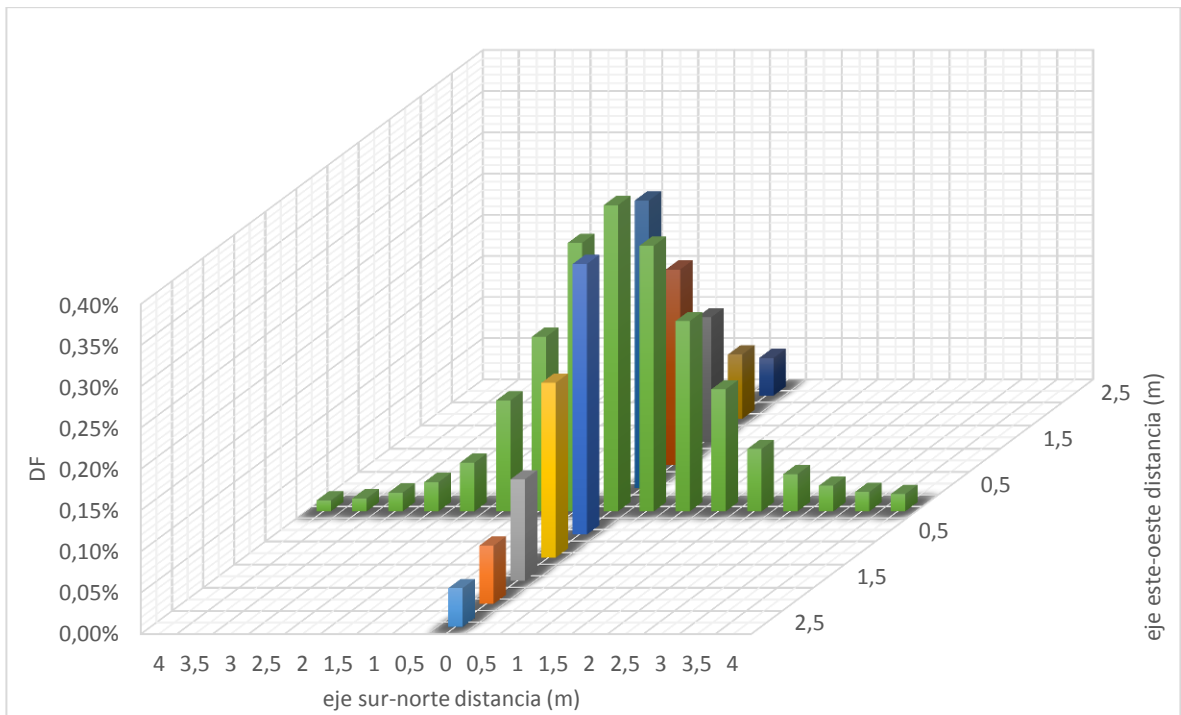


Figura B.10. Representación 3D, Df, aula IE 402, 3:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

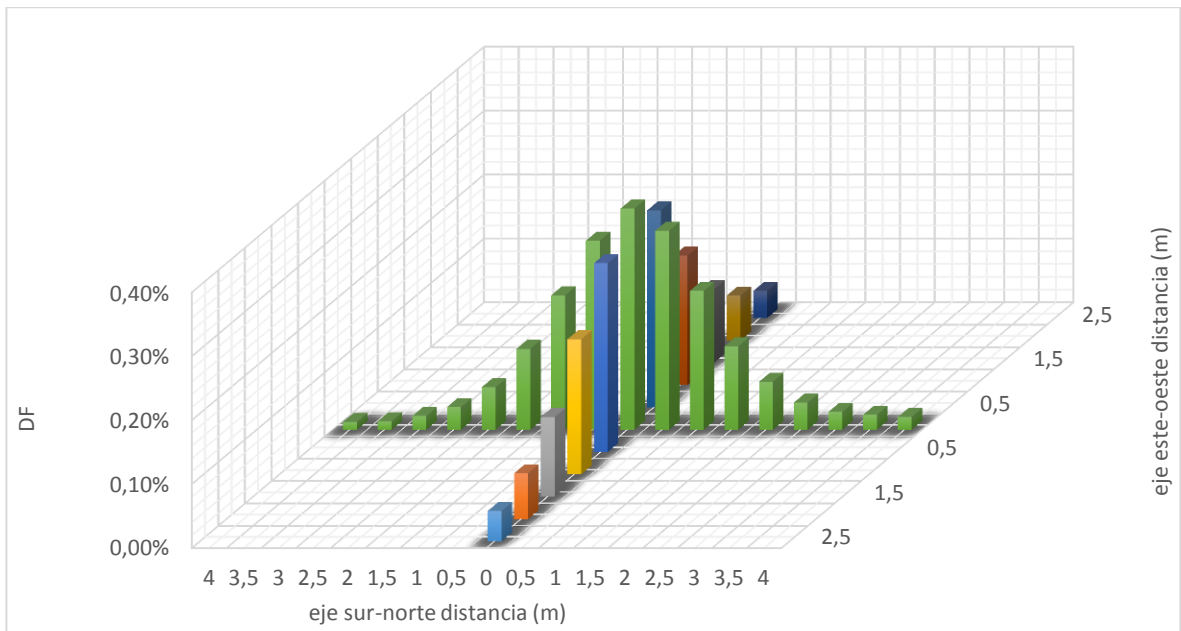
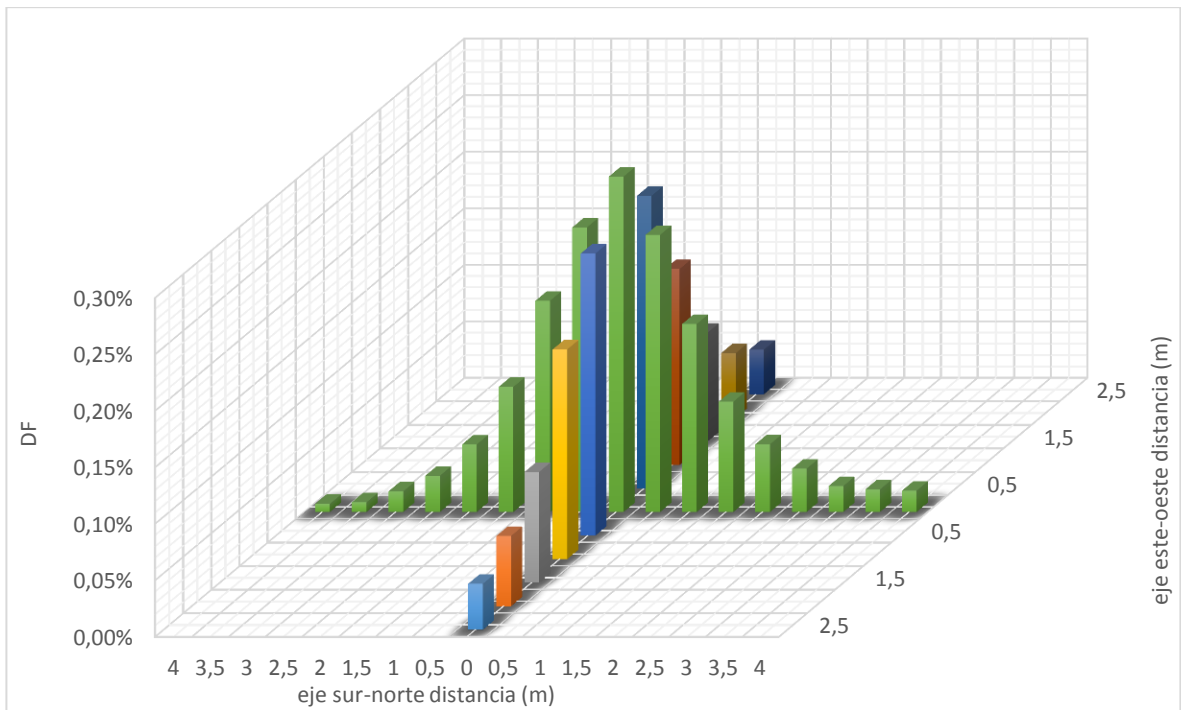


Figura B.11. Representación 3D, Df, aula IE 402, 4:00 PM, respecto a la radiación en la terraza



**Curvas características aportadas por el tubo solar ubicado en la parte norte del aula multipropósito IE 402**

Figura B.12. Representación 3D, Df, aula IE 402, 11:00 AM, respecto a la radiación en la terraza

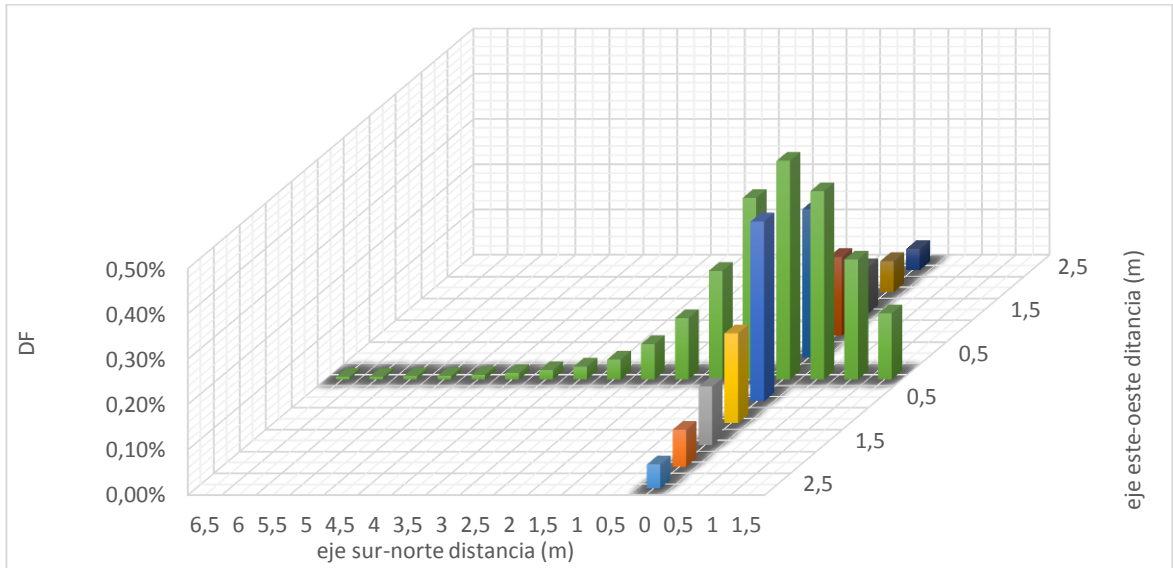


Figura B.13. Representación 3D, Df, aula IE 402, 1:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

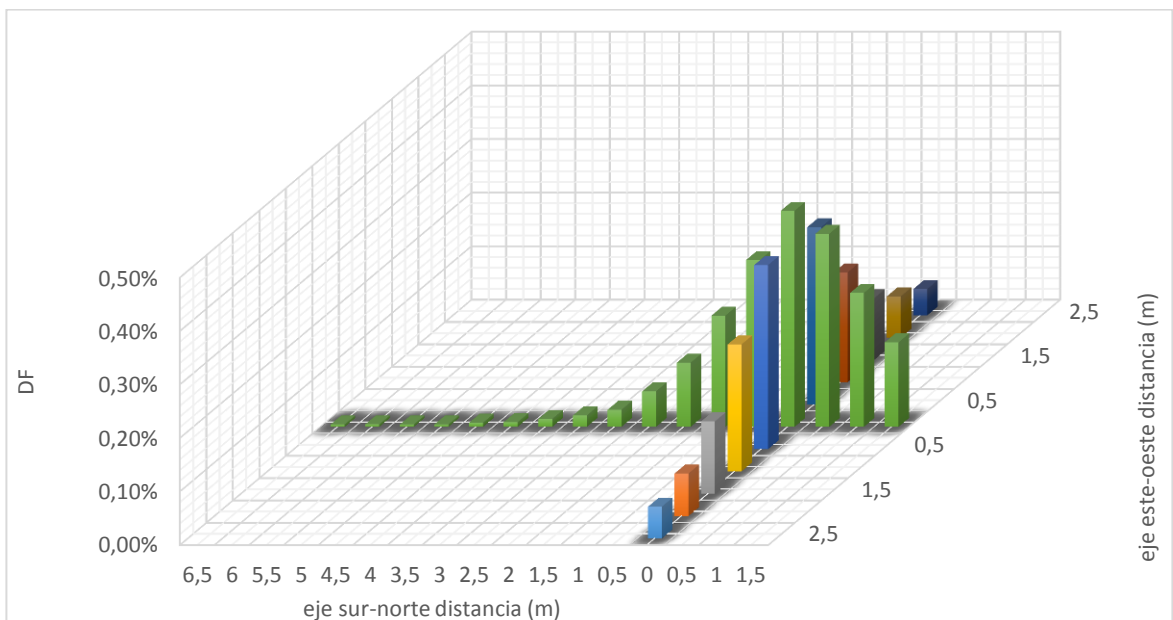


Figura B.14. Representación 3D, Df, aula IE 402, 2:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

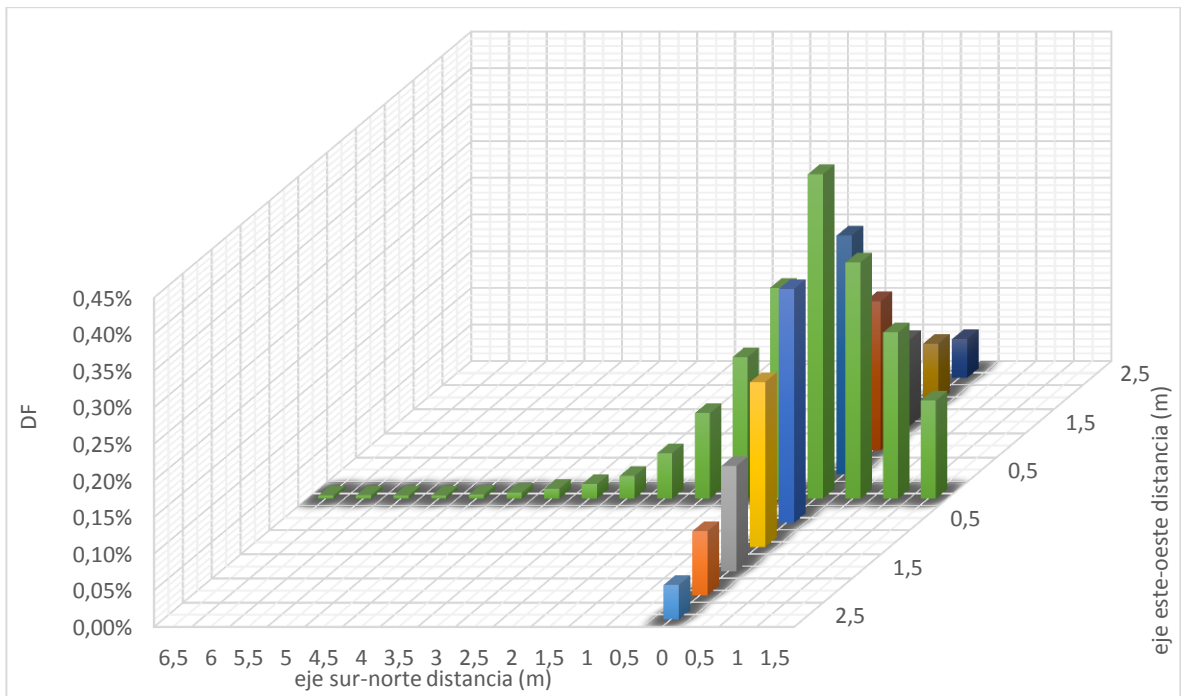


Figura B.15. Representación 3D, Df, aula IE 402, 3:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

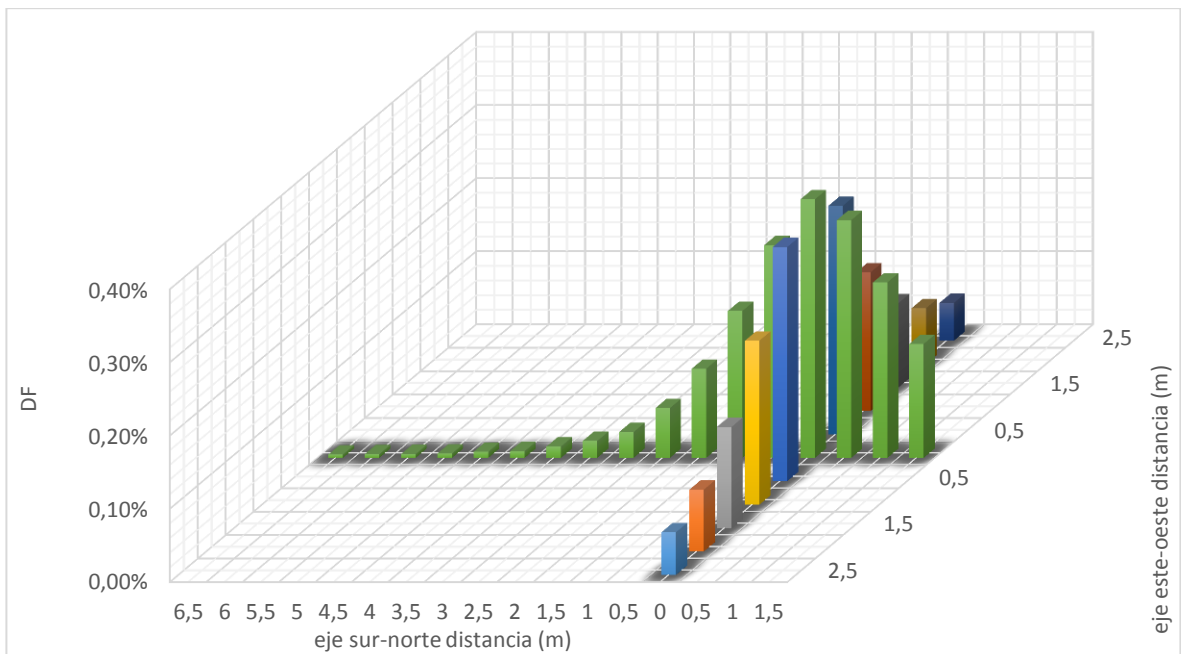
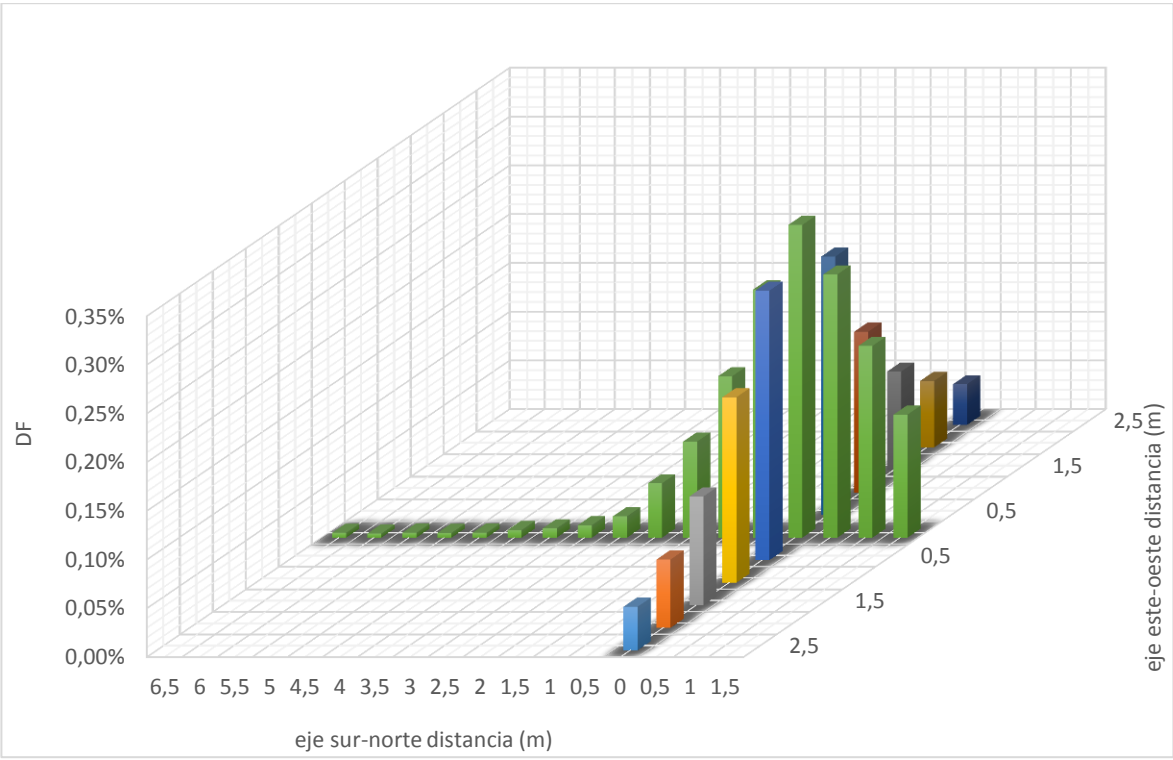


Figura B.16. Representación 3D, Df, aula IE 402, 4:00 PM, respecto a la radiación en la terraza



## ANEXO C. CURVAS DE COMPORTAMIENTO LUMÍNICO DEL DF (SIMULACIONES)

Este anexo presenta todas las curvas de comportamiento lumínico enfatizados en el aporte lumínico de los tubos solares en el aula multipropósito del edificio de ingeniería Eléctrica de la UIS, por medio de simulaciones en el software DIALux.

### Curvas características aula multipropósito IE 402

El comportamiento de la luz diurna dentro del aula multipropósito IE 402, aportada por los tubos solares, respecto a la incidencia solar en la terraza, se representa mediante el conjunto de Tablas y Figuras que se presentan a continuación, las cuales se describen mediante el Df (daylight factor) en función de los puntos del enmallado.

Figura C.1. Representación 3D, Df, aula IE 402, 11:00 AM, respecto a la radiación en la terraza.

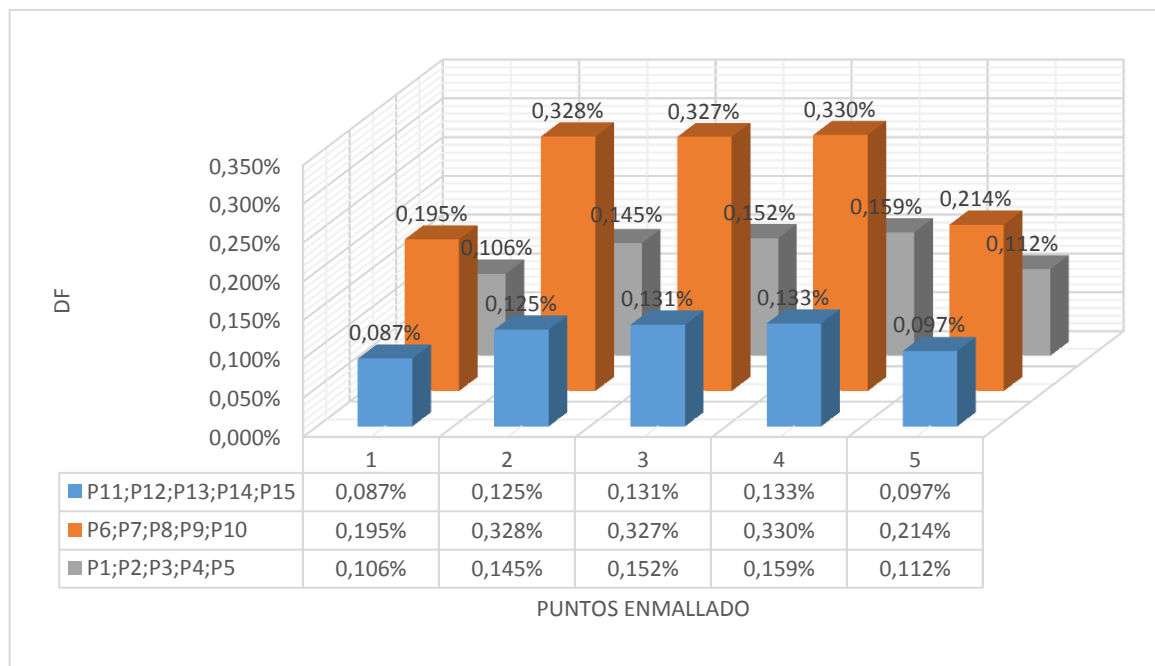


Figura C.2. Representación 3D, Df, aula IE 402, 1:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

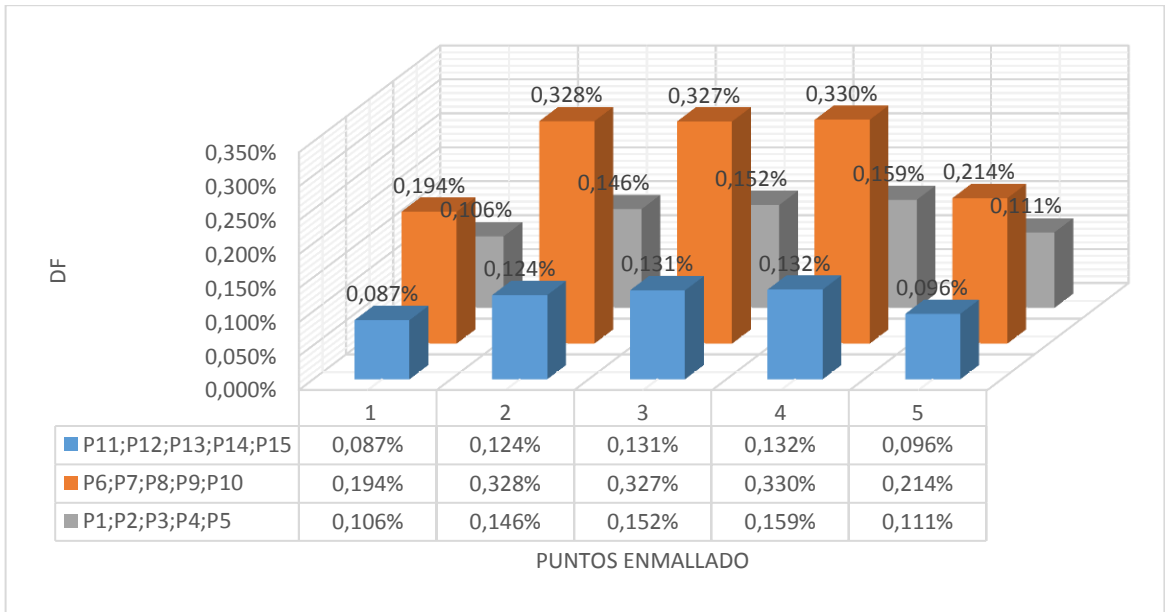


Figura C.3. Representación 3D, Df, aula IE 402, 2:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

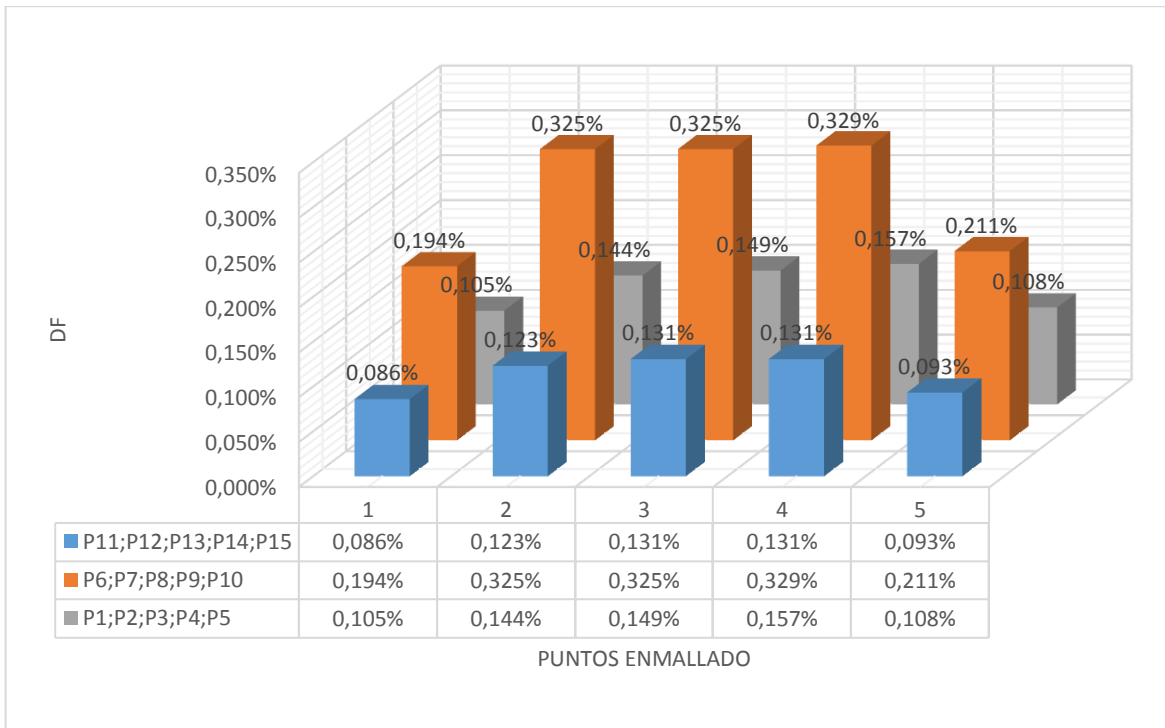


Figura C.4. Representación 3D, Df, aula IE 402, 3:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

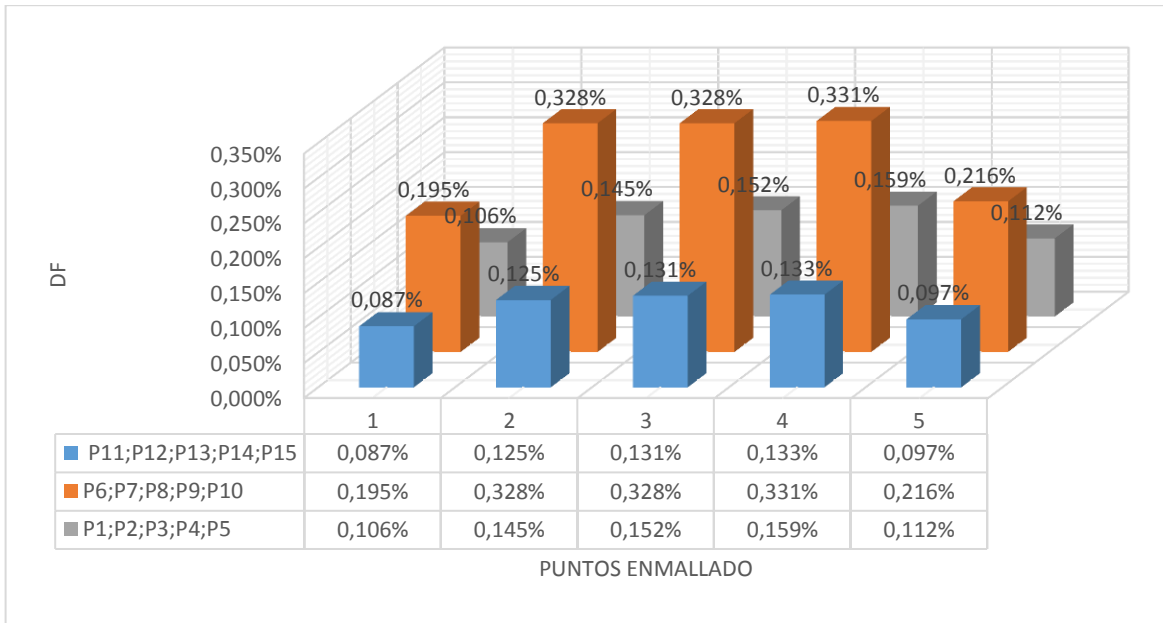


Figura C.5. Representación 3D, Df, aula IE 402, 4:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

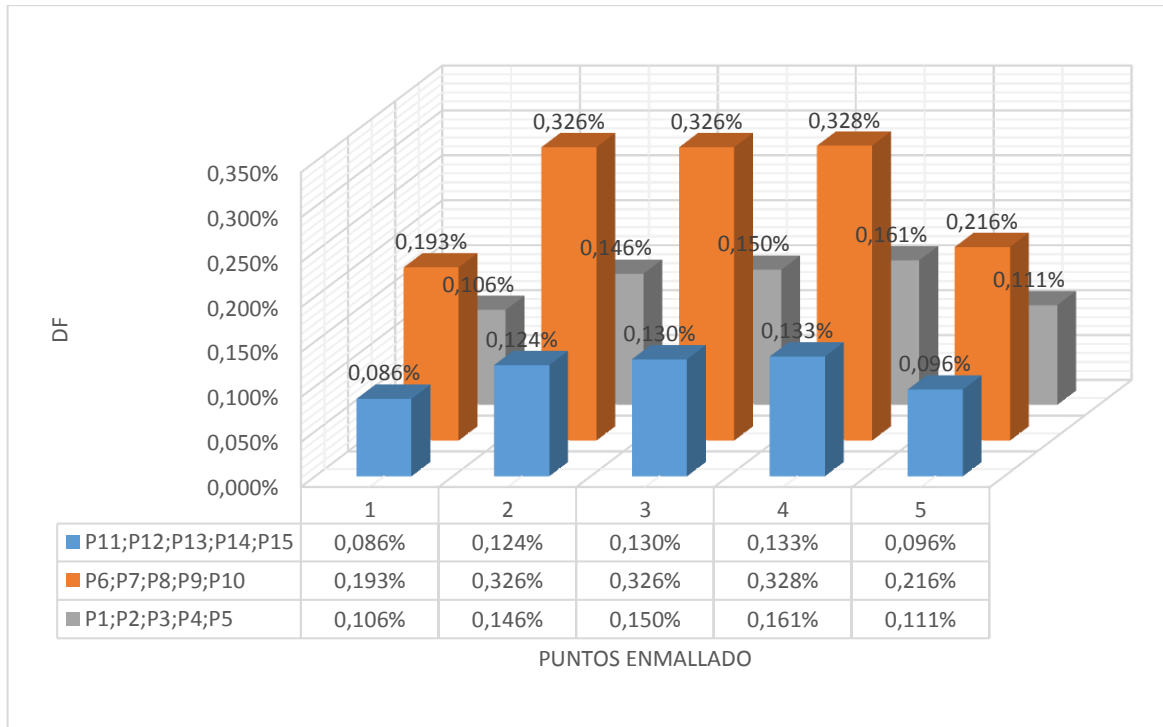
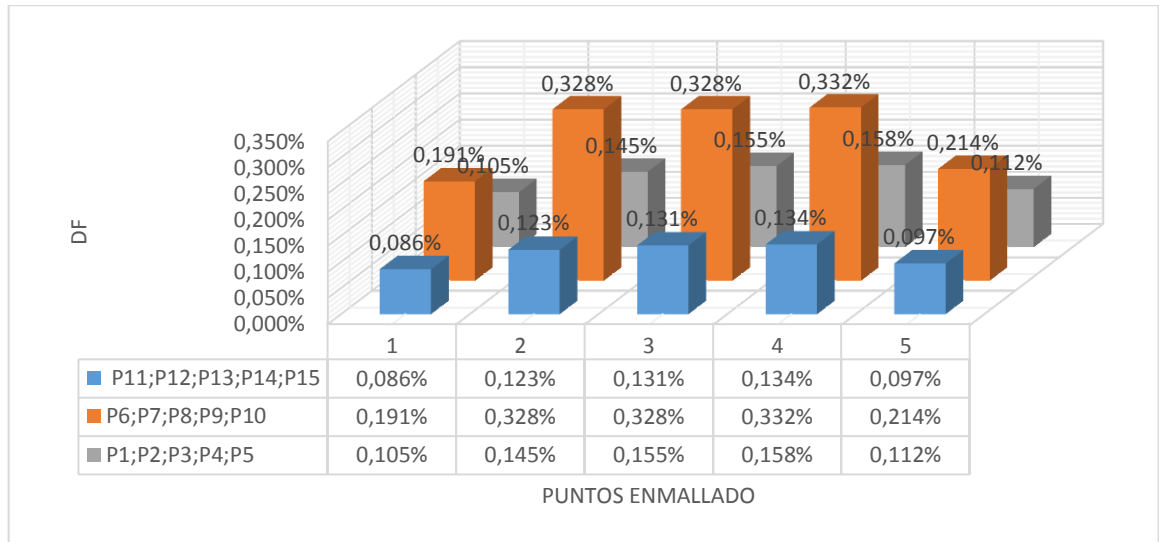


Figura C.6. Representación 3D, Df, aula IE 402, 5:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.



**Curvas características aportadas por el tubo solar ubicado en la parte central del aula multipropósito IE 402**

Figura C.7. Representación 3D, Df, aula IE 402, 11:00 AM, respecto a la radiación en la terraza

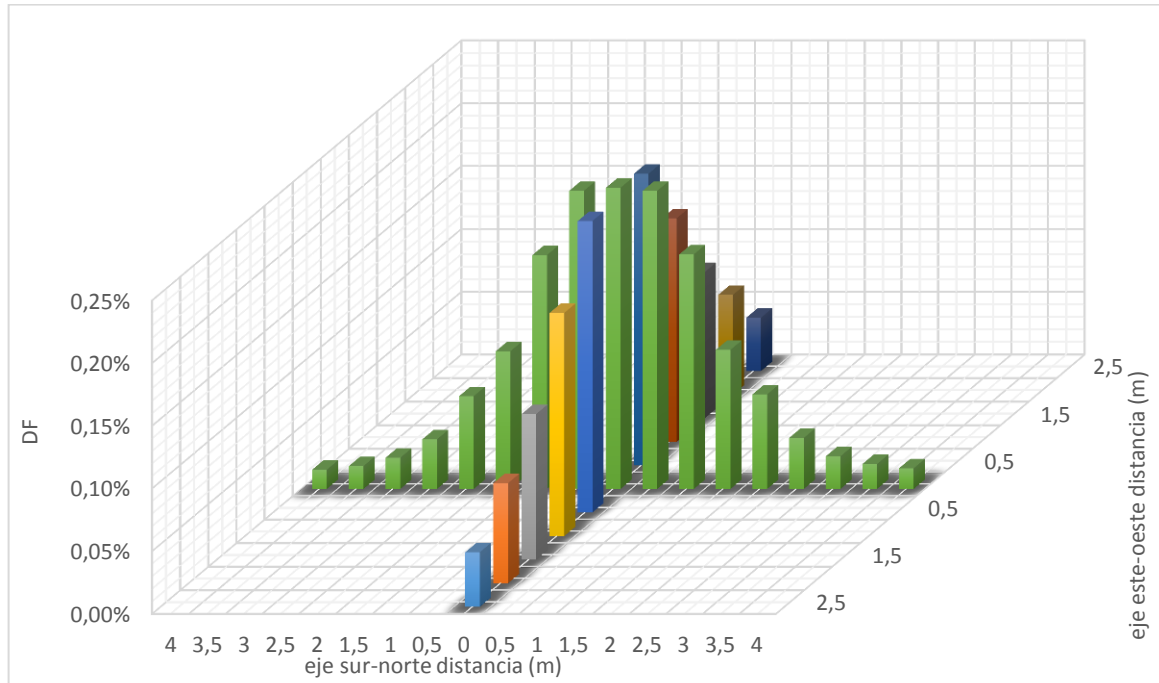


Figura C.8. Representación 3D, Df, aula IE 402, 1:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

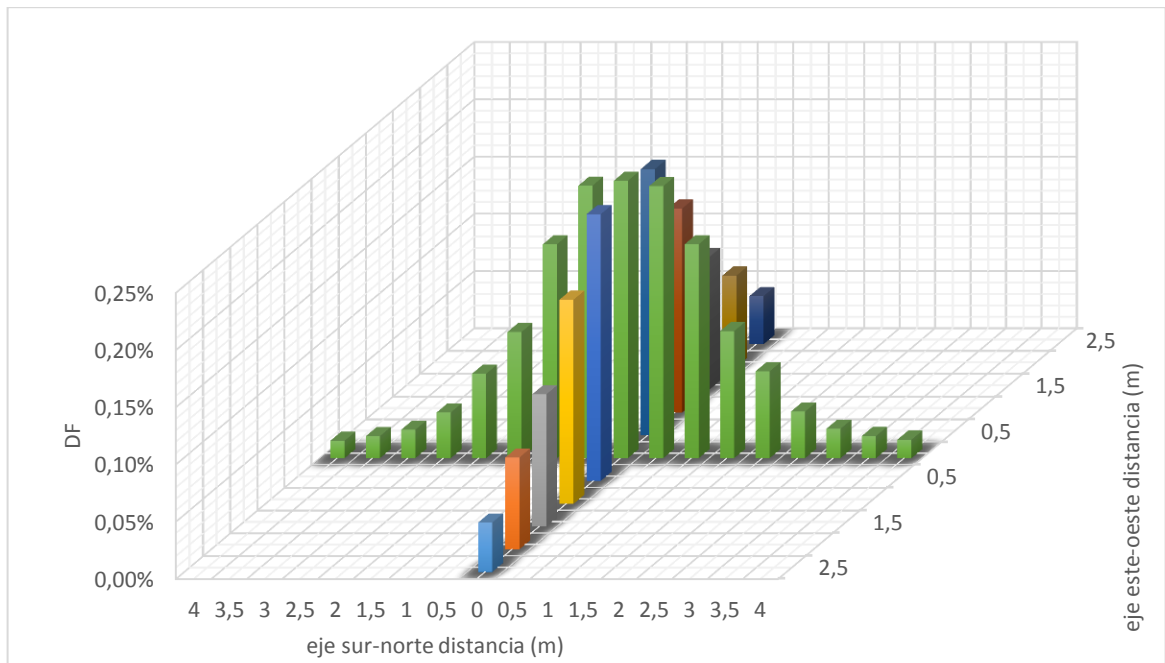


Figura C.9. Representación 3D, Df, aula IE 402, 2:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

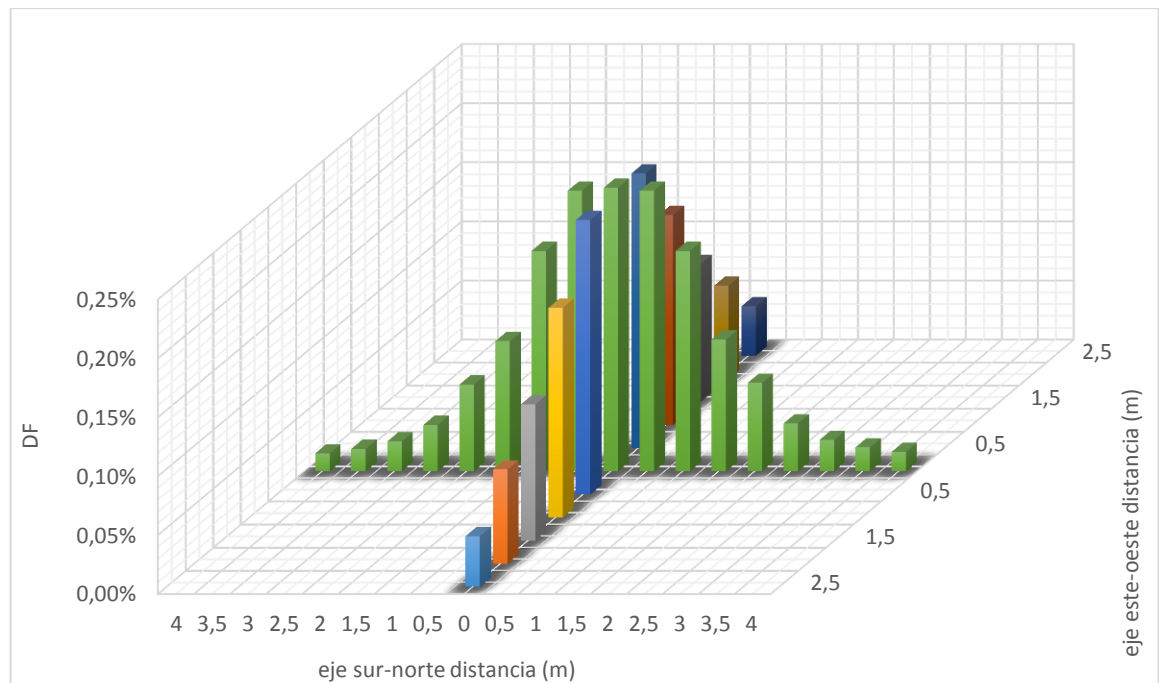


Figura C.10. Representación 3D, Df, aula IE 402, 3:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

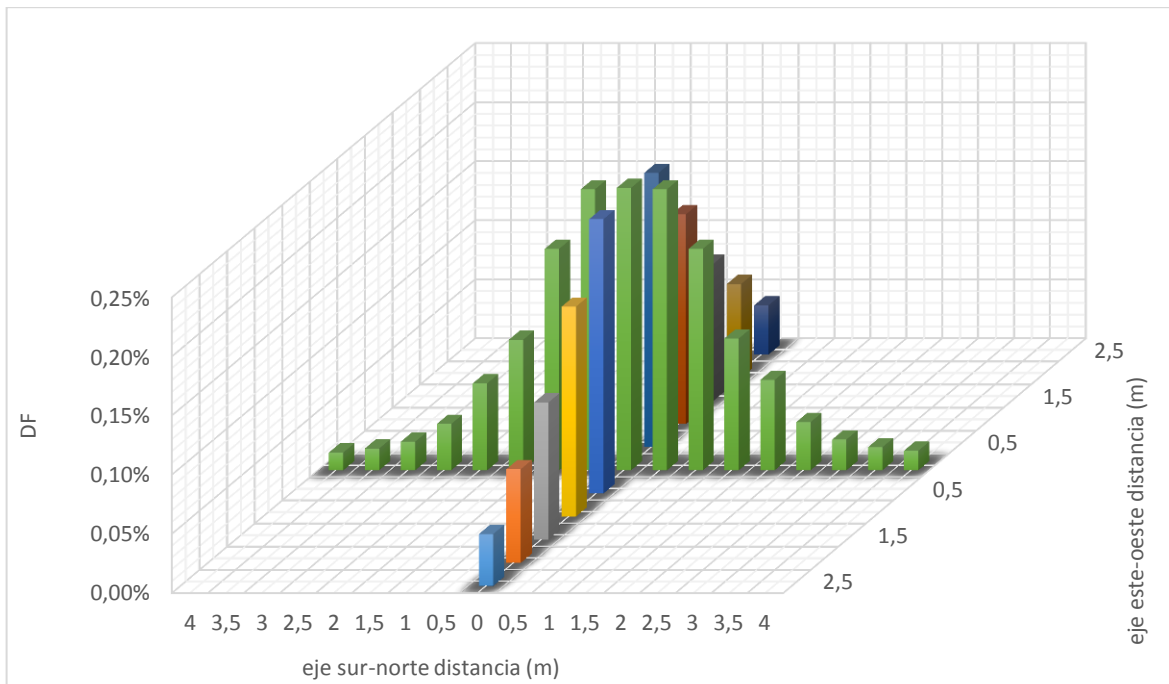
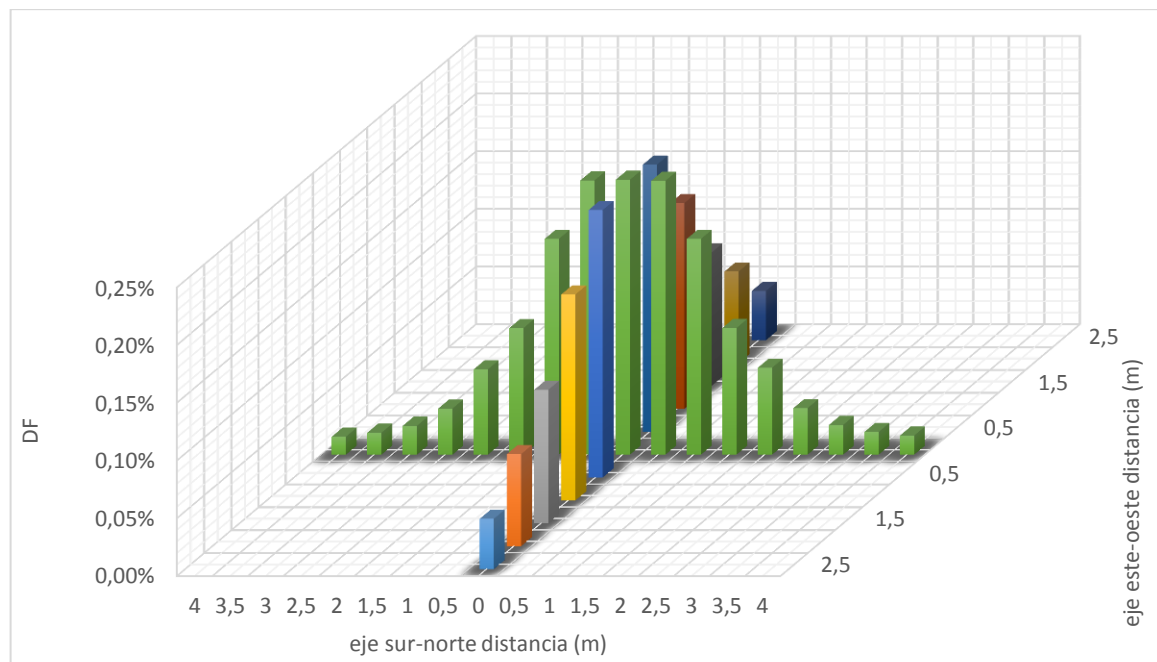


Figura C.11. Representación 3D, Df, aula IE 402, 4:00 PM, respecto a la radiación en la terraza



**Curvas características aportadas por el tubo solar ubicado en la parte norte del aula multipropósito IE 402**

Figura C.12. Representación 3D, Df, aula IE 402, 11:00 AM, respecto a la radiación en la terraza

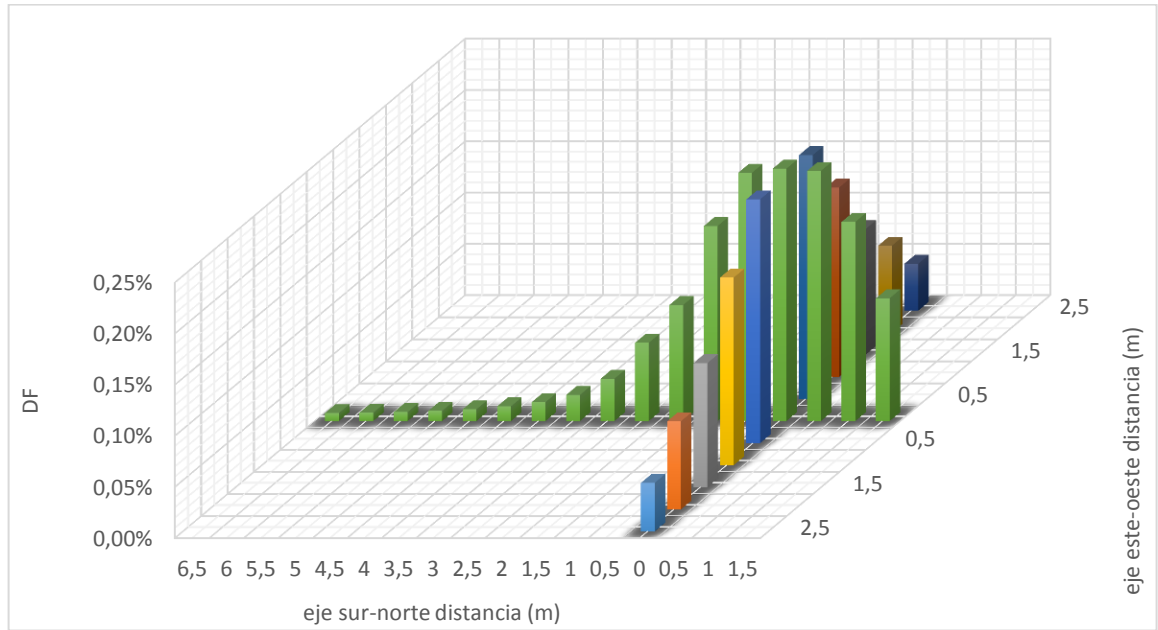


Figura C.13. Representación 3D, Df, aula IE 402, 1:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

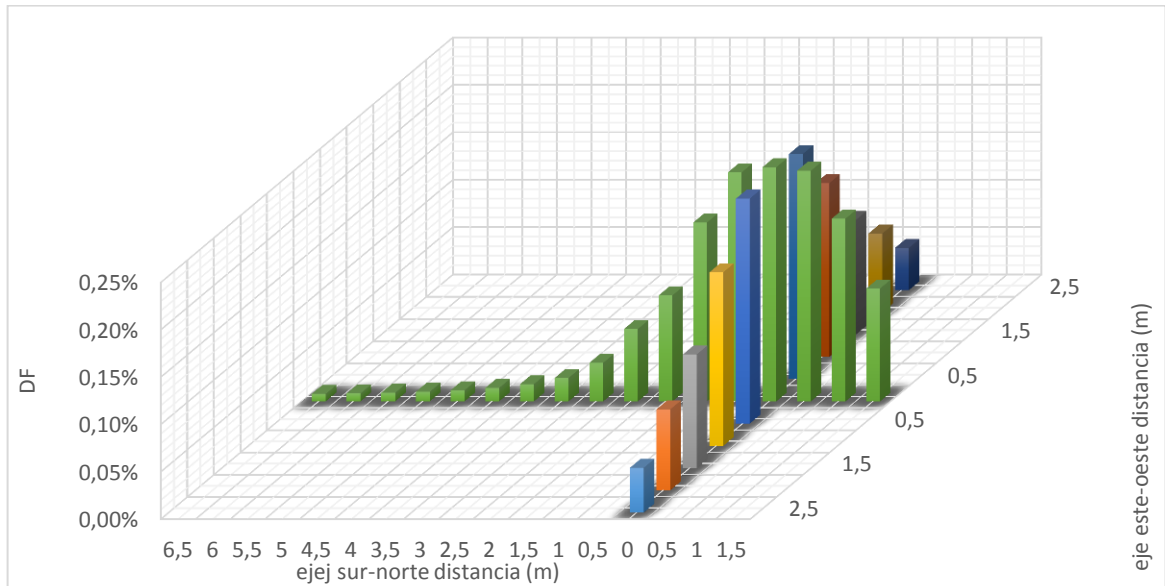


Figura C.14. Representación 3D, Df, aula IE 402, 2:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

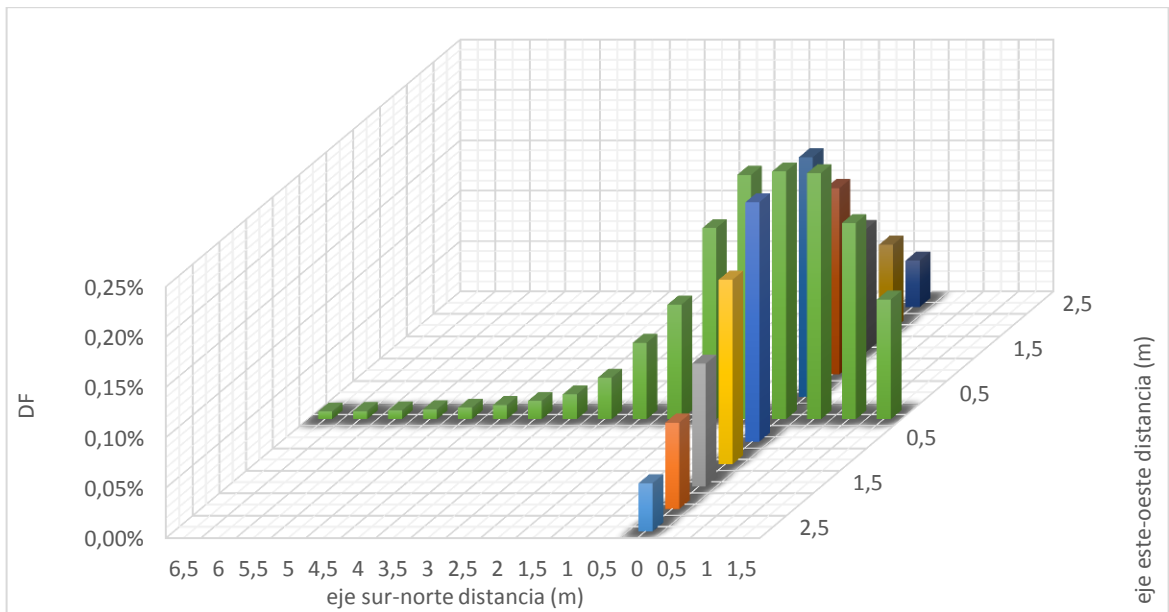


Figura C.15. Representación 3D, Df, aula IE 402, 3:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

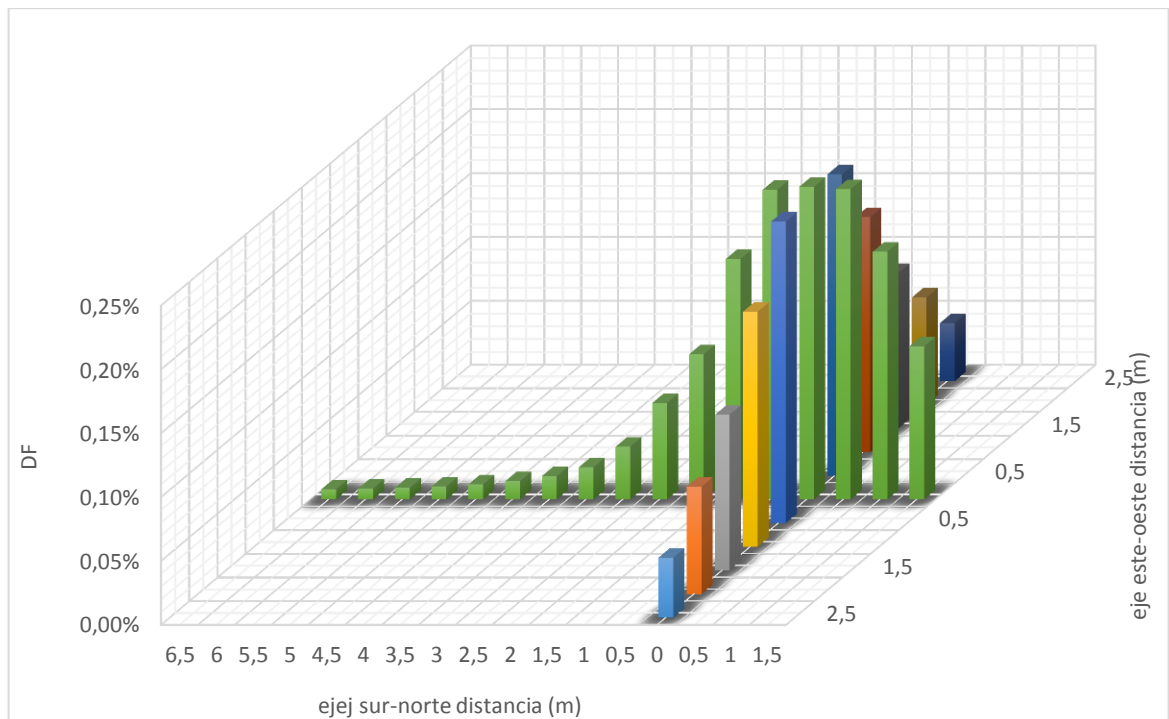
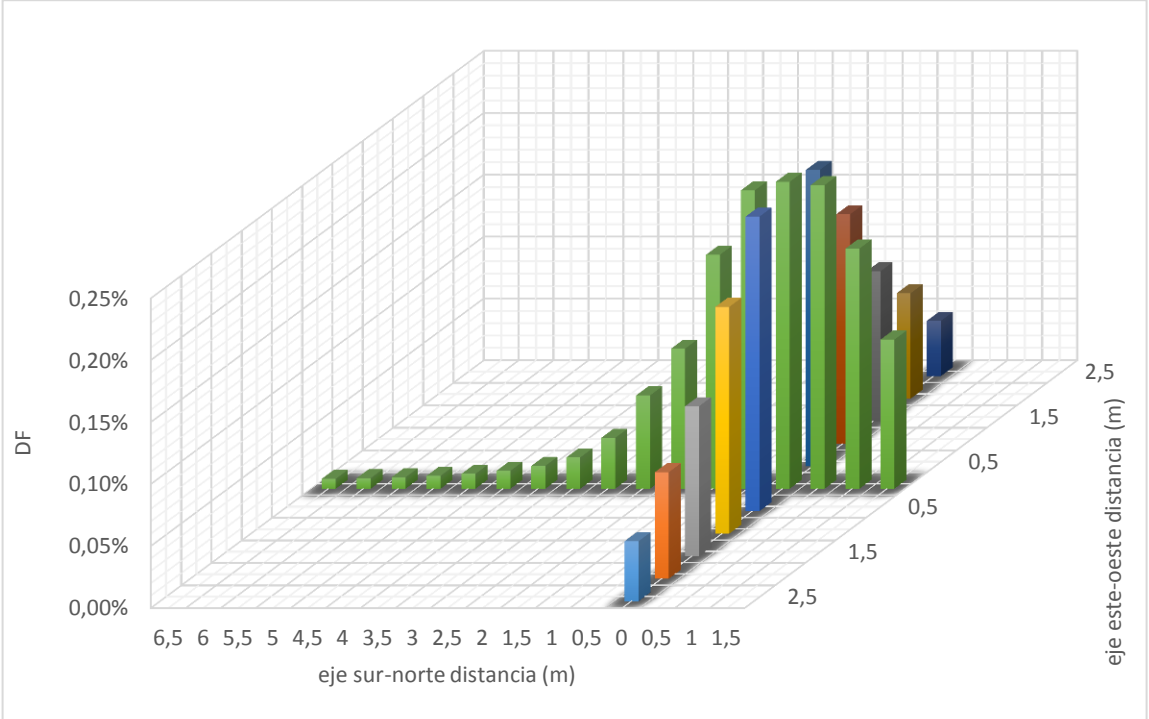


Figura C.16. Representación 3D, Df, aula IE 402, 4:00 PM, respecto a la radiación en la terraza



## ANEXO D. CURVAS DE COMPORTAMIENTO LUMÍNICO DE E (MEDICIONES)

El comportamiento de la luz diurna dentro del aula multipropósito IE 402, aportada por los tubos solares, respecto a la incidencia solar en la terraza, se representa mediante el conjunto de Tablas y Figuras que se presentan a continuación, las cuales se describen mediante la iluminancia (E) en función de la distancia horizontal.

Figura D.1. Representación 3D, E, aula IE 402, 11:00 AM, respecto a la radiación en la terraza.

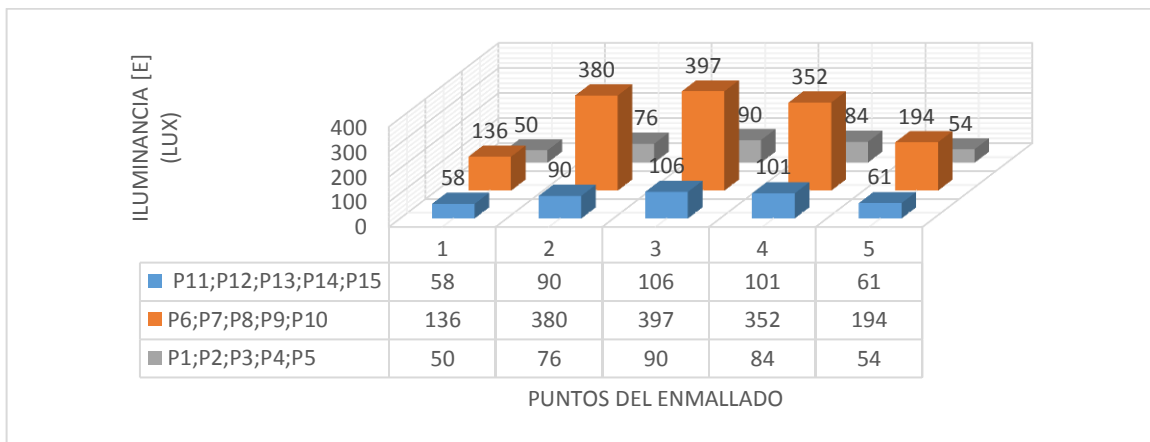


Figura D.2. Representación 3D, E, aula IE 402, 1:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

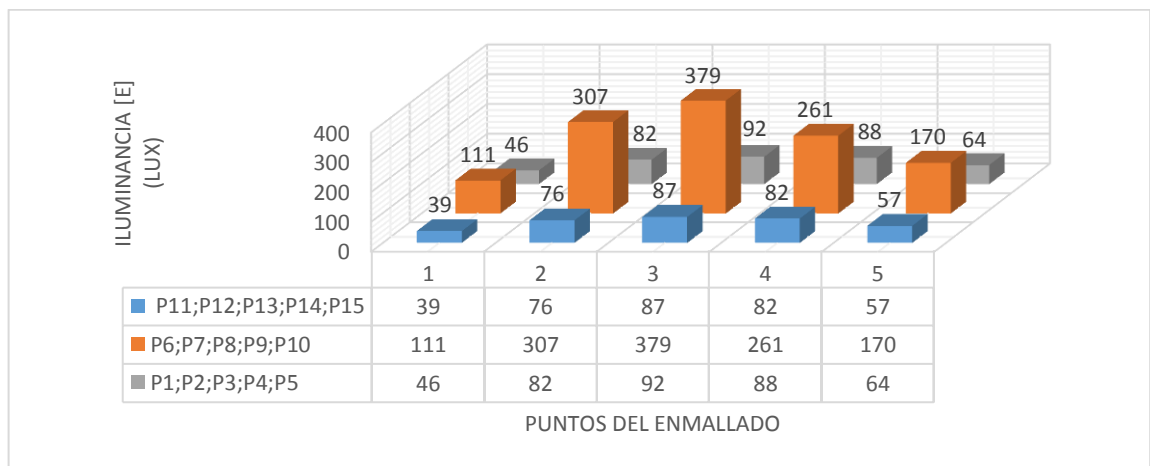


Figura D.3. Representación 3D, E, aula IE 402, 2:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

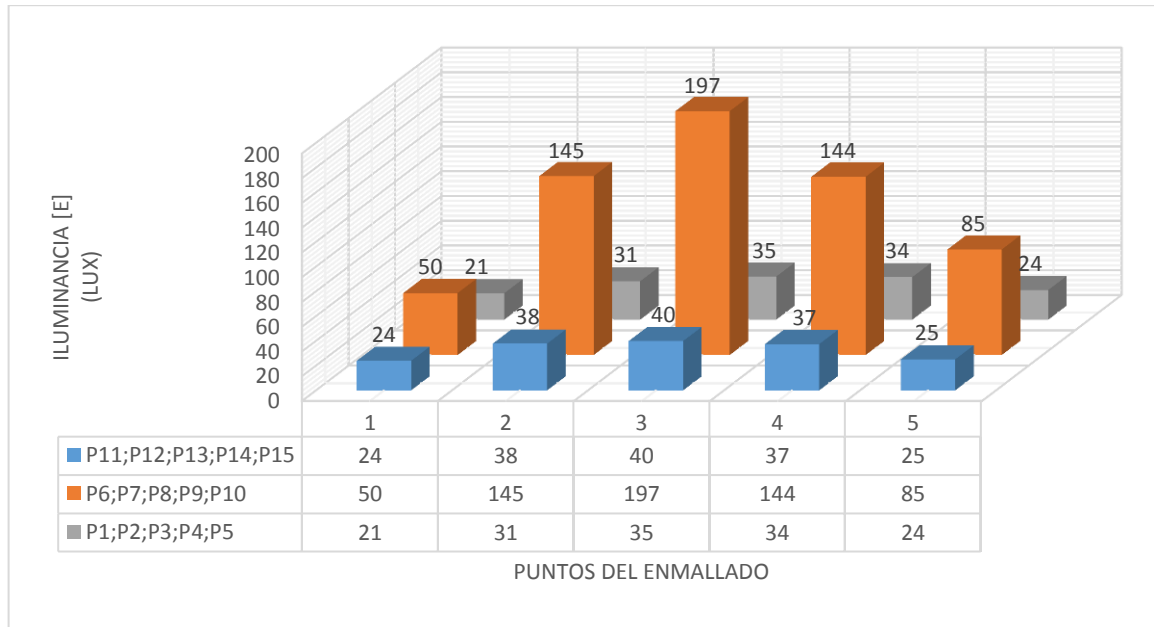


Figura D.4. Representación 3D, E, aula IE 402, 3:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

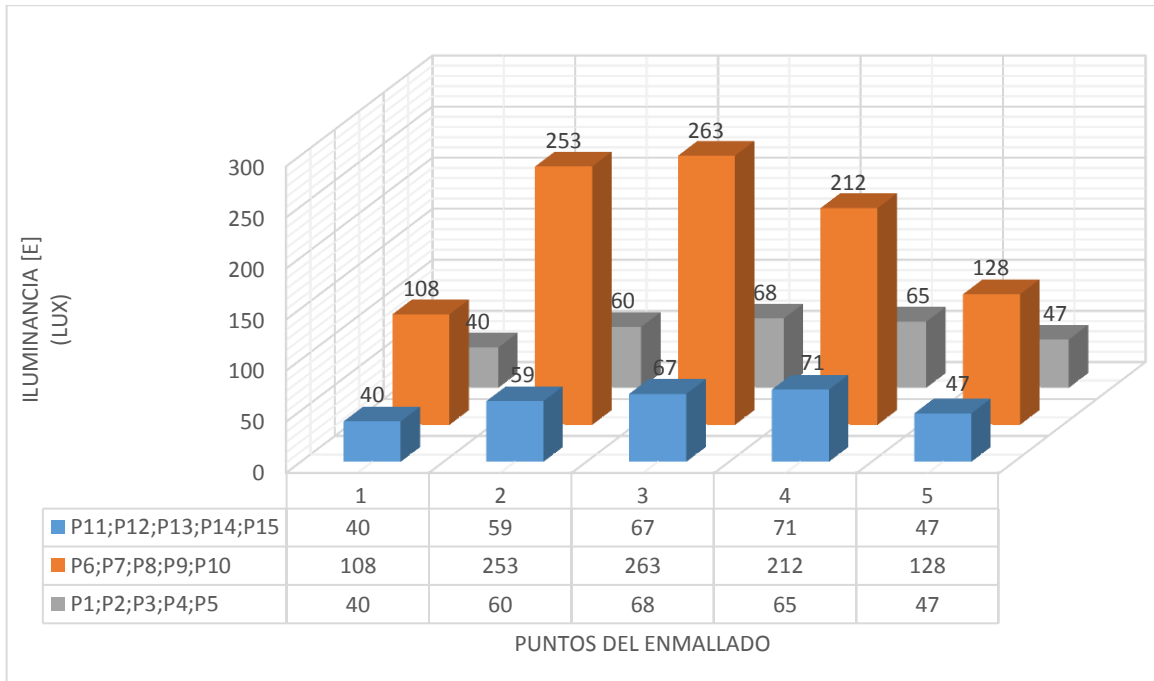


Figura D.5. Representación 3D, E, aula IE 402, 4:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

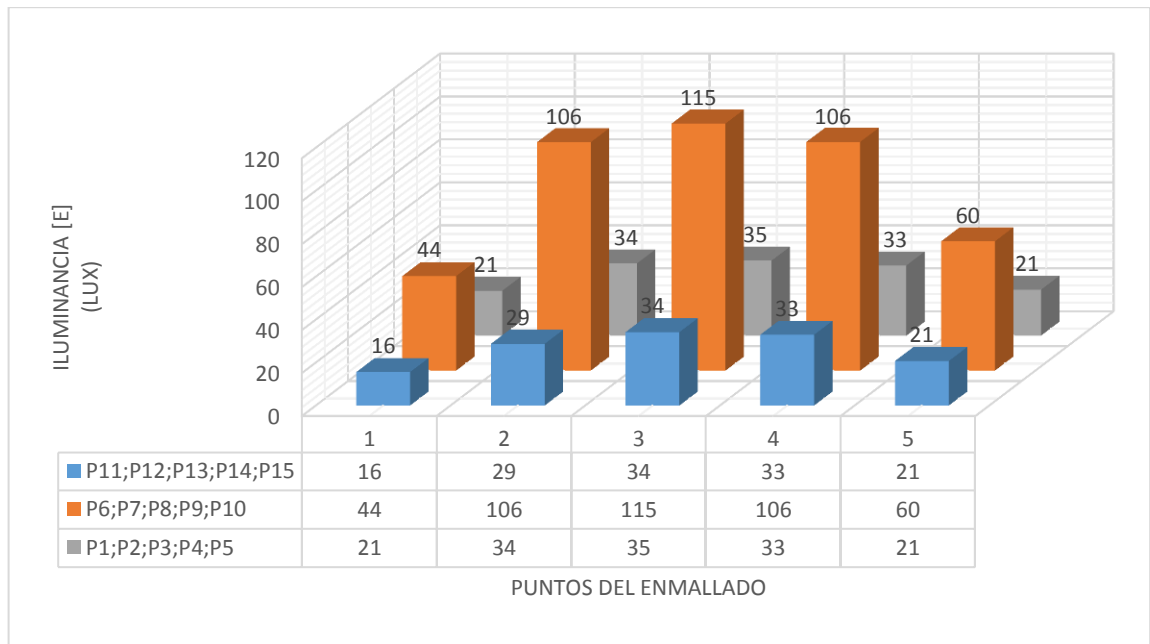
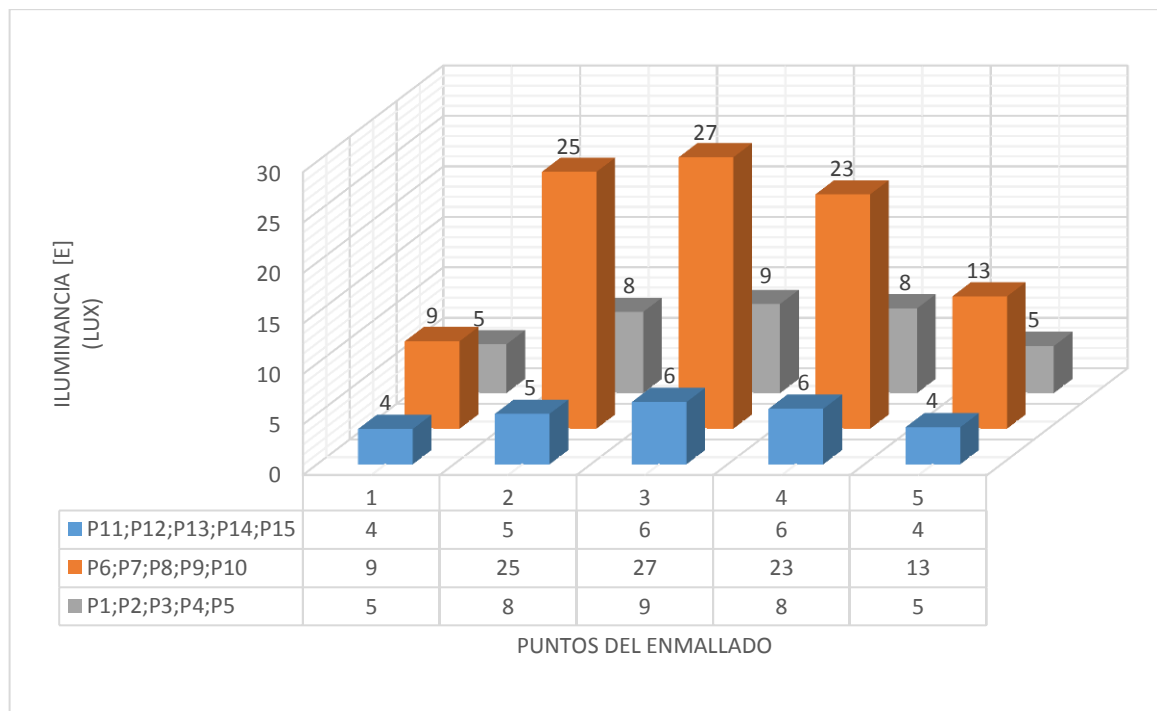


Figura D.6. Representación 3D, E, aula IE 402, 5:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.



**Curvas características aportadas por el tubo solar ubicado en la parte central del aula multipropósito IE 402**

Figura D.7. Representación 3D, E, aula IE 402, 11:00 AM, respecto a la radiación en la terraza

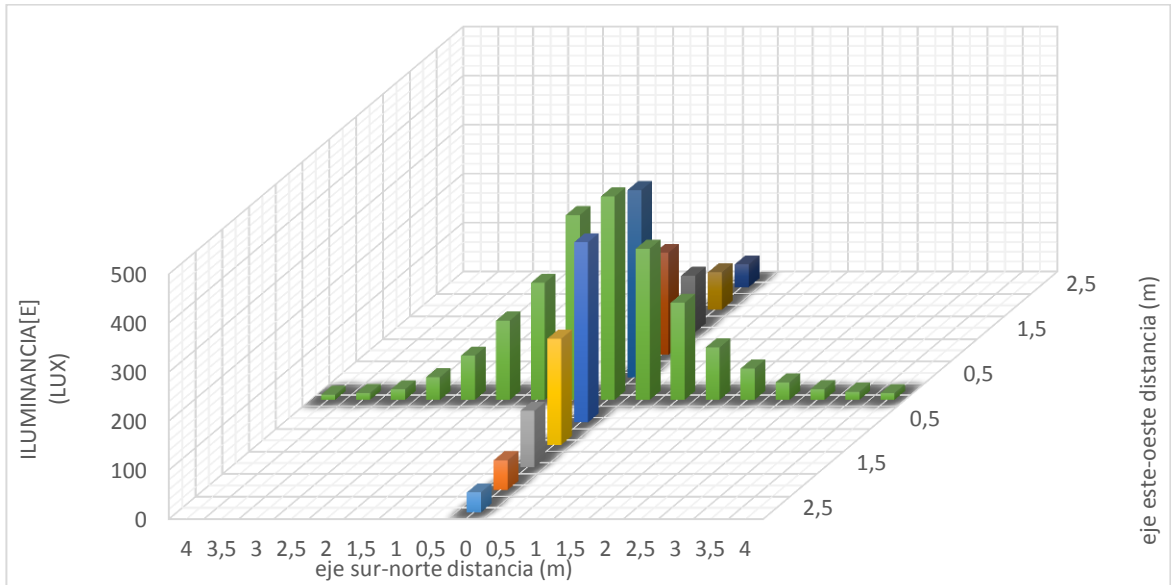


Figura D.8. Representación 3D, E, aula IE 402, 1:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

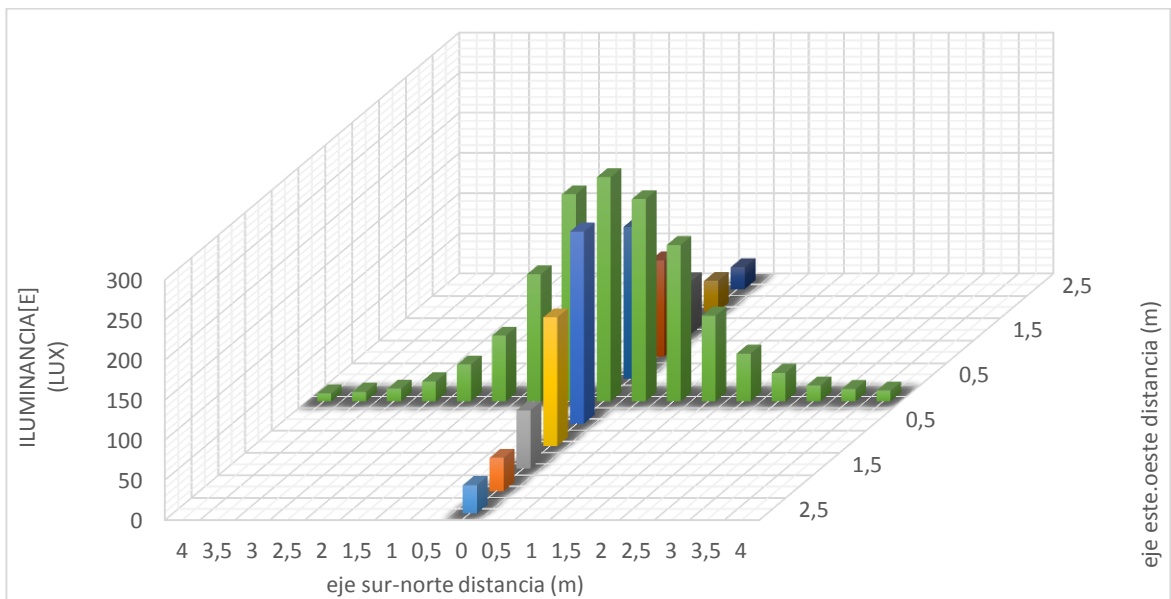


Figura D.9. Representación 3D, E, aula IE 402, 2:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

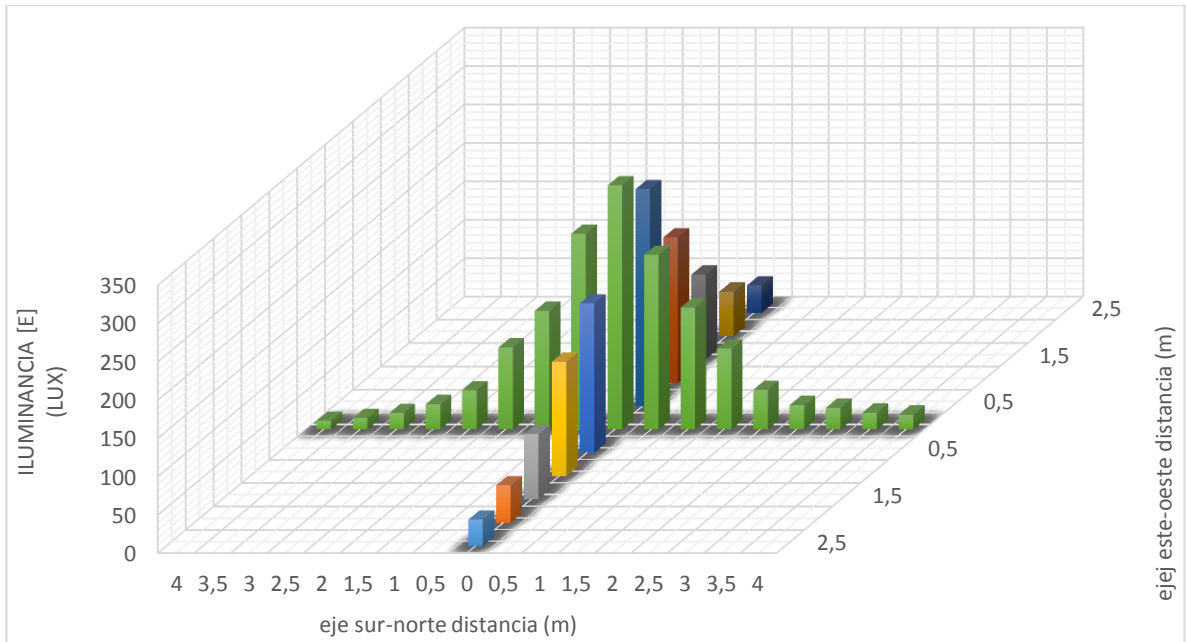


Figura D.10. Representación 3D, E, aula IE 402, 3:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

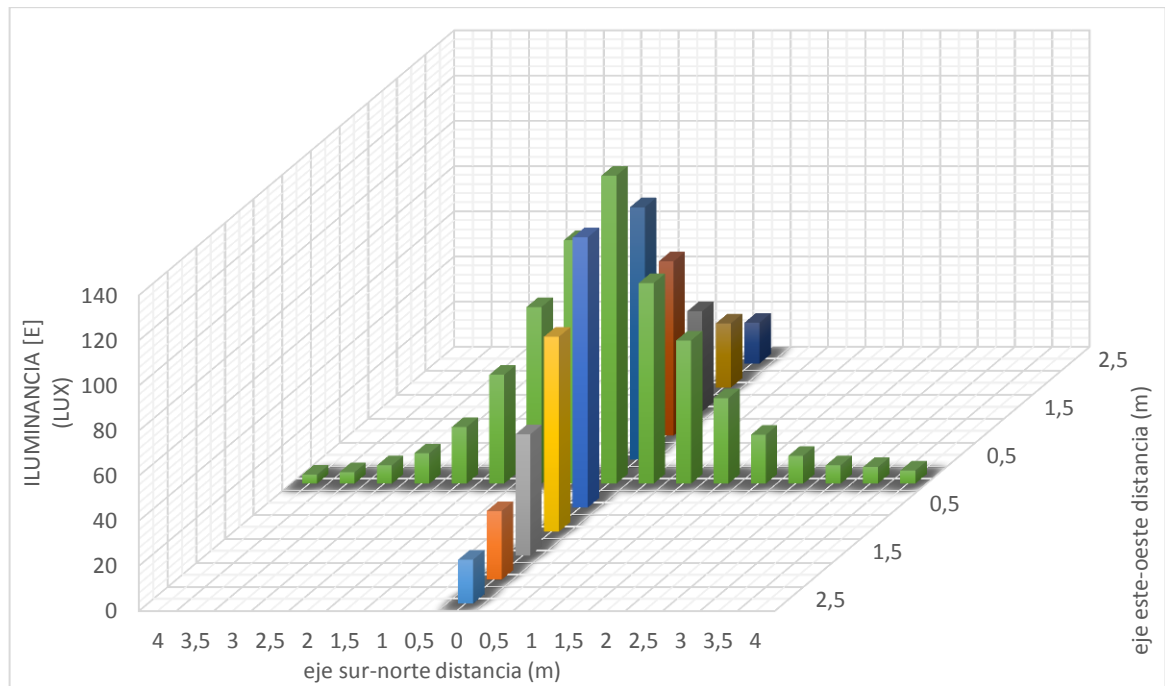
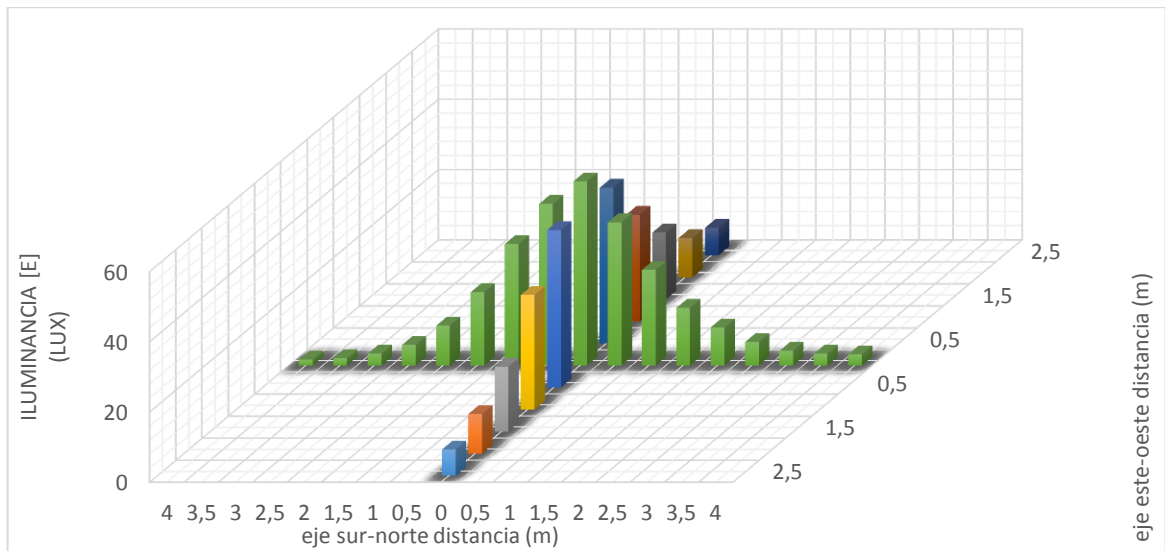


Figura D.11. Representación 3D, E, aula IE 402, 4:00 PM, respecto a la radiación en la terraza



**Curvas características aportadas por el tubo solar ubicado en la parte norte del aula multipropósito IE 402**

Figura D.12. Representación 3D, E, aula IE 402, 11:00 AM, respecto a la radiación en la terraza

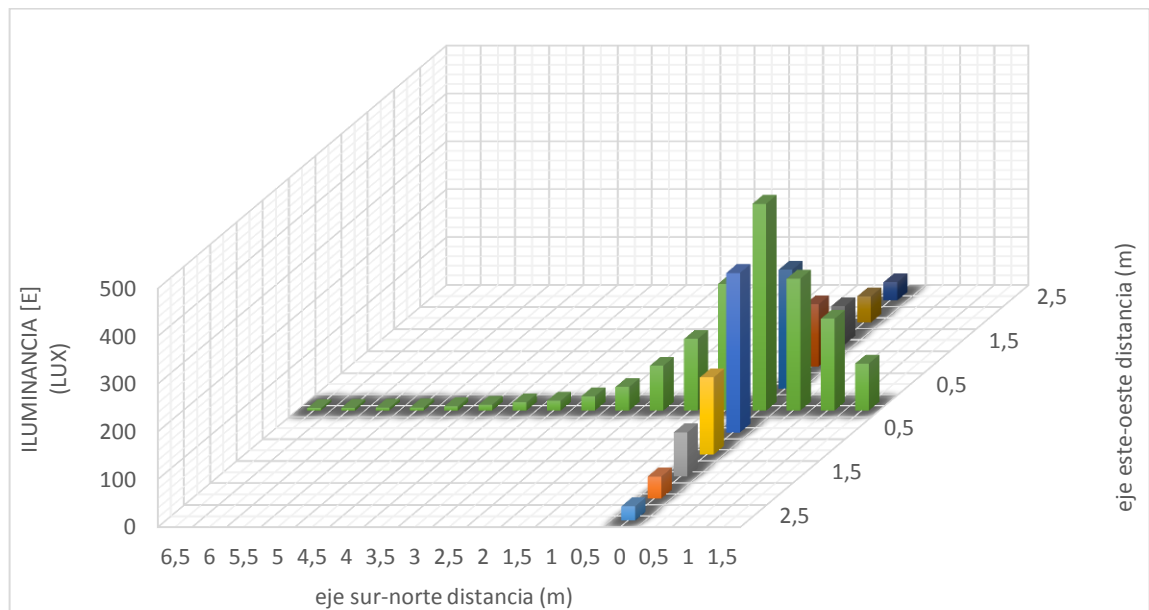


Figura D.13. Representación 3D, E, aula IE 402, 1:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

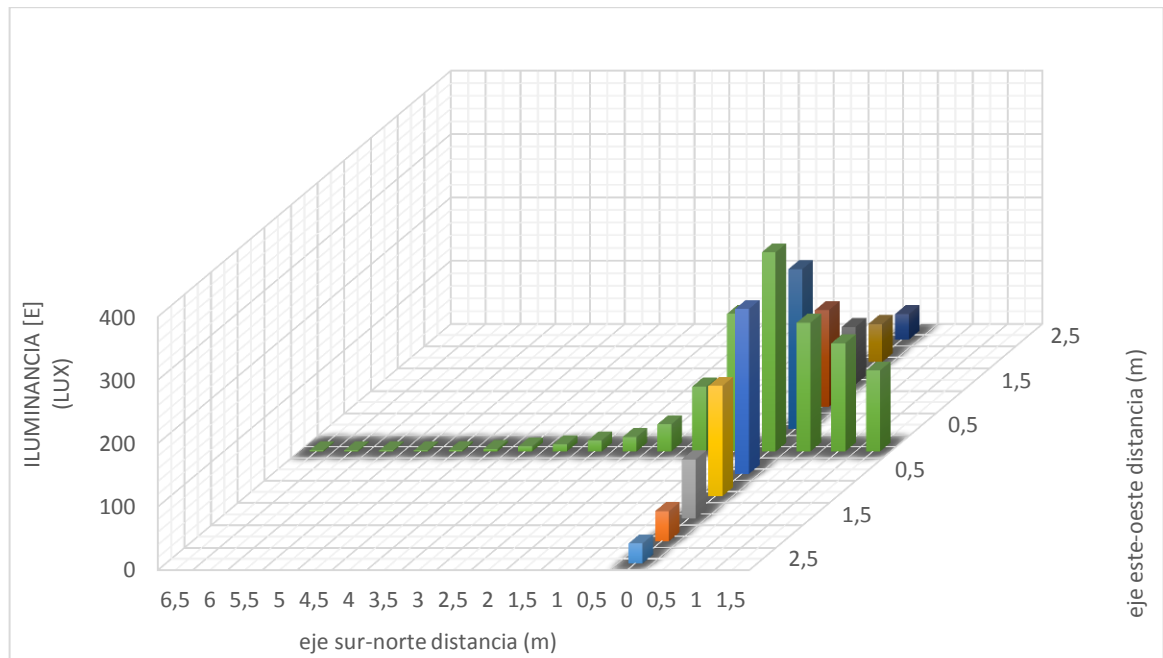


Figura D.14. Representación 3D, E, aula IE 402, 2:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

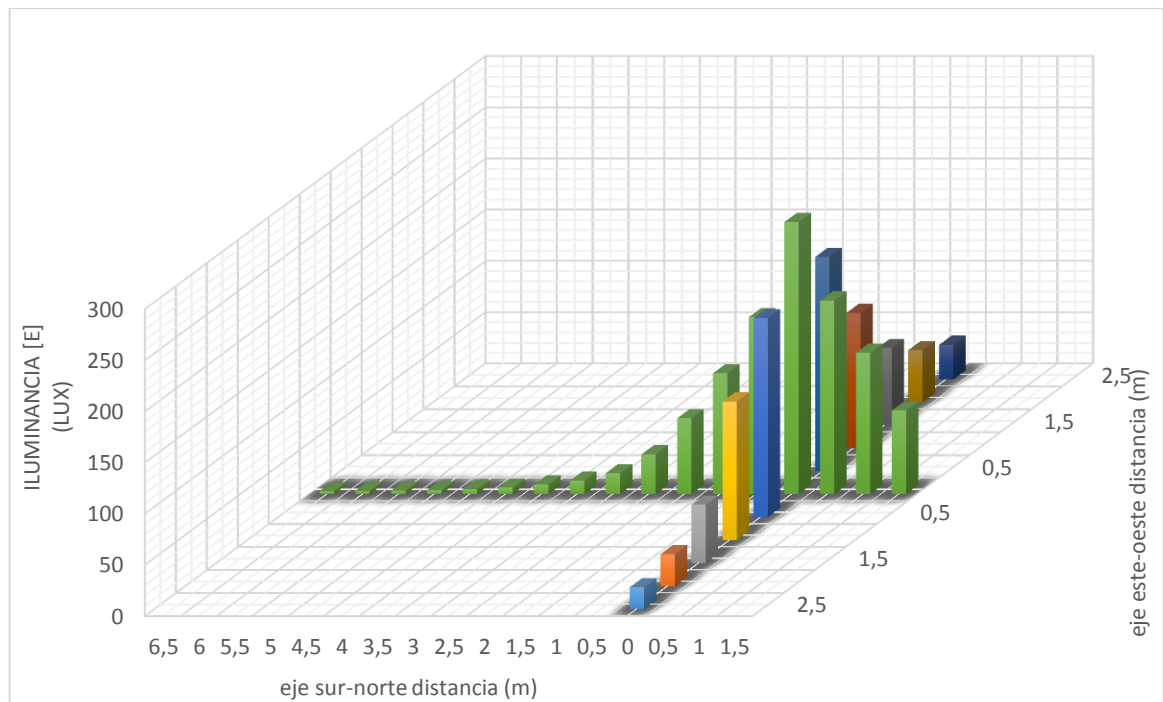


Figura D.15. Representación 3D, E, aula IE 402, 3:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

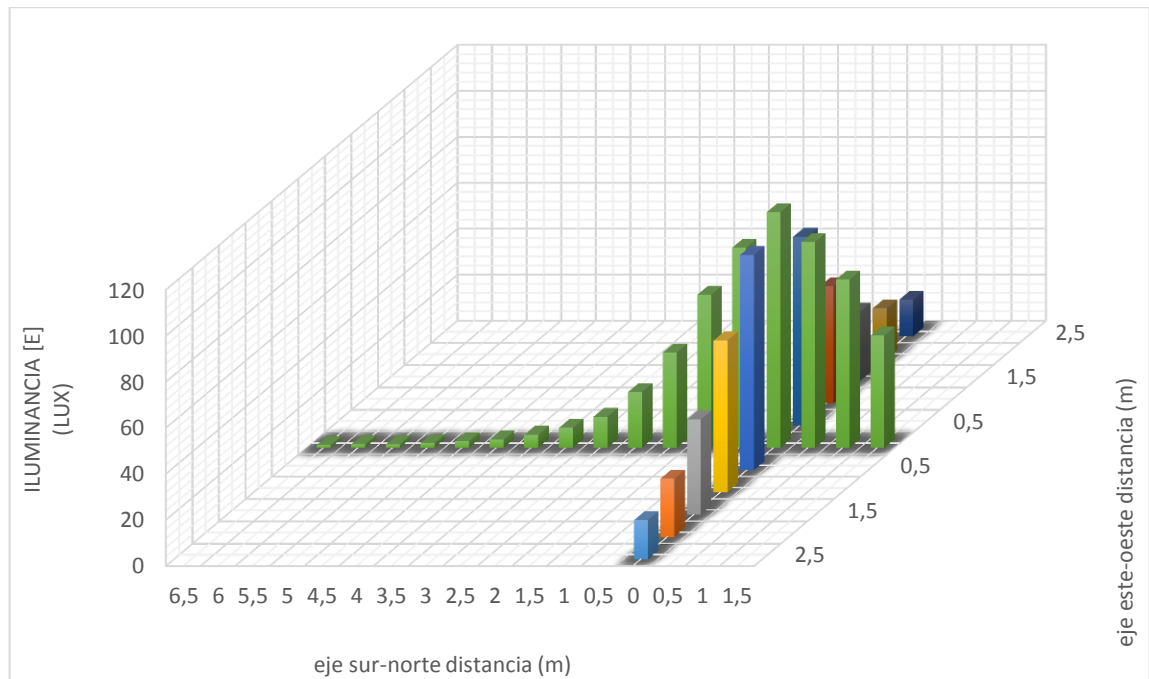
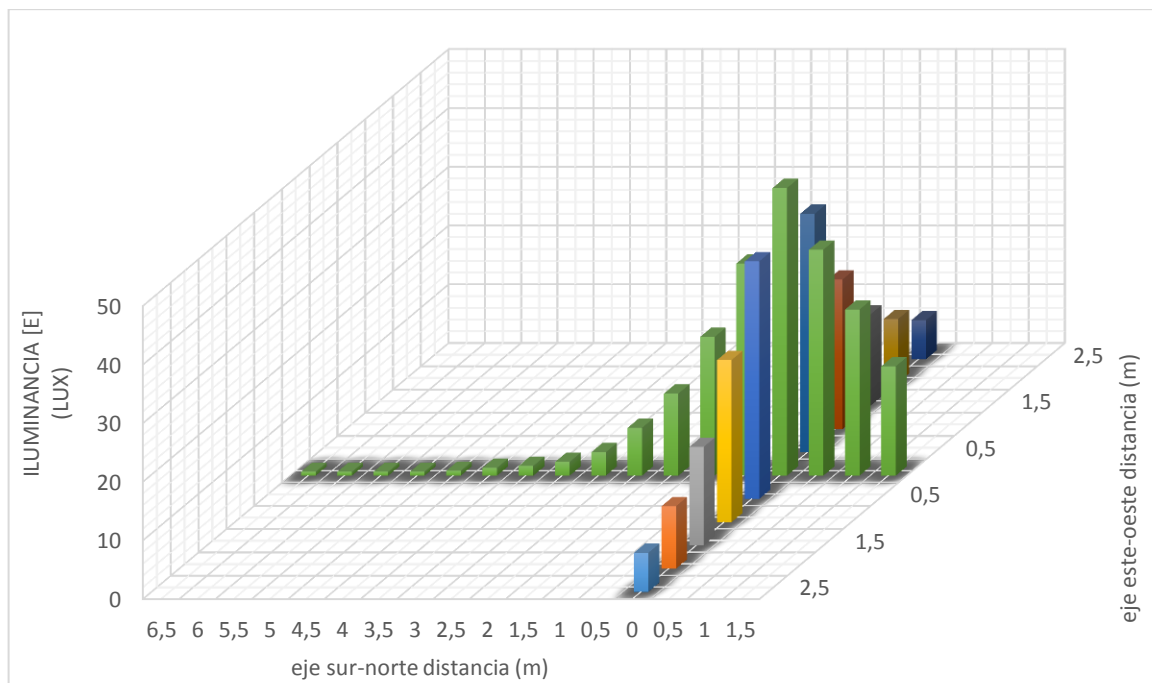


Figura D.16. Representación 3D, E, aula IE 402, 4:00 PM, respecto a la radiación en la terraza



## ANEXO E. CURVAS DE COMPORTAMIENTO LUMÍNICO DE E (SIMULACIONES)

Este anexo presenta todas las curvas de comportamiento lumínico enfatizados en el aporte lumínico de los tubos solares en el aula multipropósito del edificio de ingeniería Eléctrica de la UIS, por medio de simulaciones en el software DIALux.

### Curvas características aula multipropósito IE 402

El comportamiento de la luz diurna dentro del aula multipropósito IE 402, aportada por los tubos solares, respecto a la incidencia solar en la terraza, se representa mediante el conjunto de Tablas y Figuras que se presentan a continuación, las cuales se describen mediante la iluminancia (E) en función de los puntos del enmallado.

Figura E.1. Representación 3D, E, aula IE 402, 11:00 AM, respecto a la radiación en la terraza.

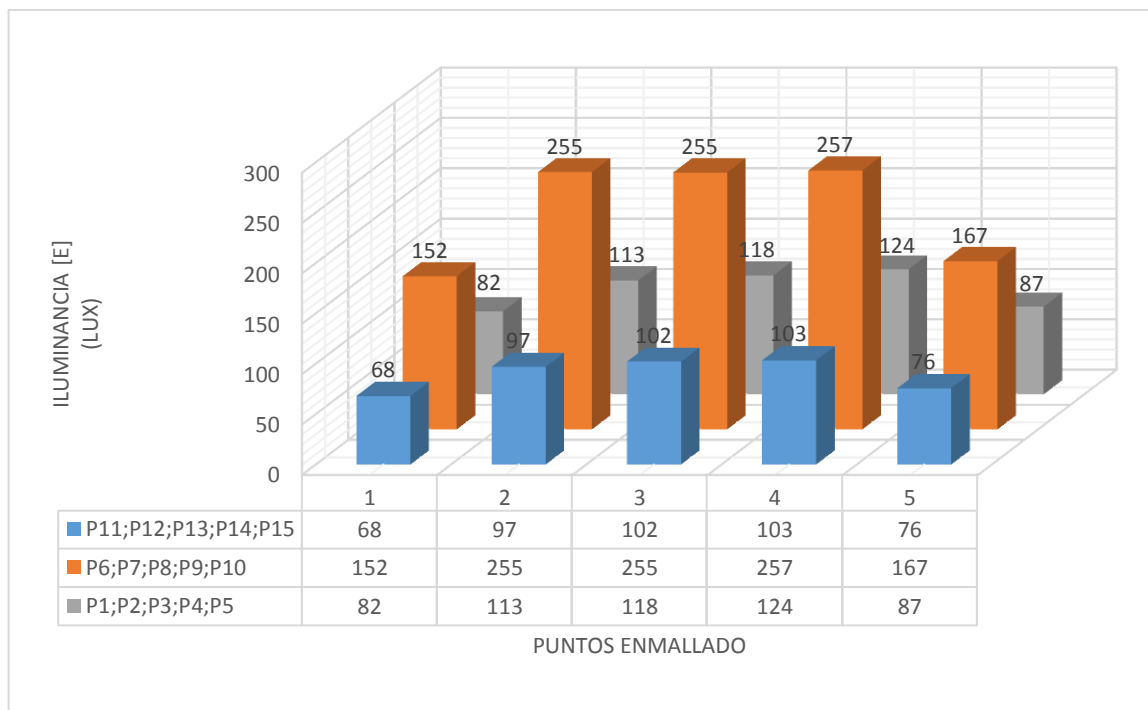


Figura E.2. Representación 3D, E, aula IE 402, 1:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

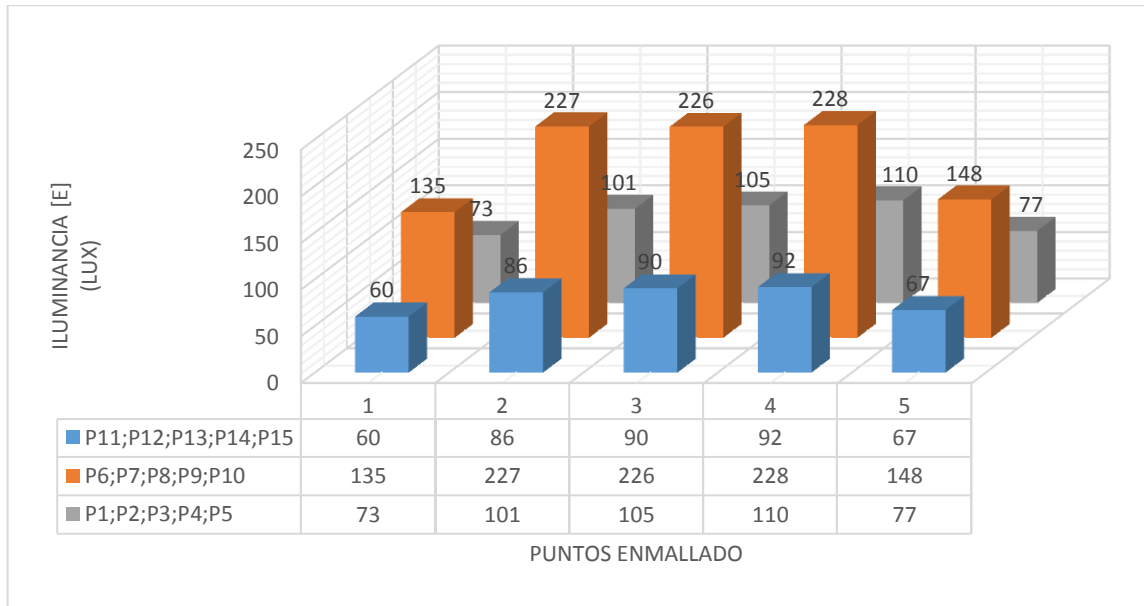


Figura E.3. Representación 3D, E, aula IE 402, 2:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

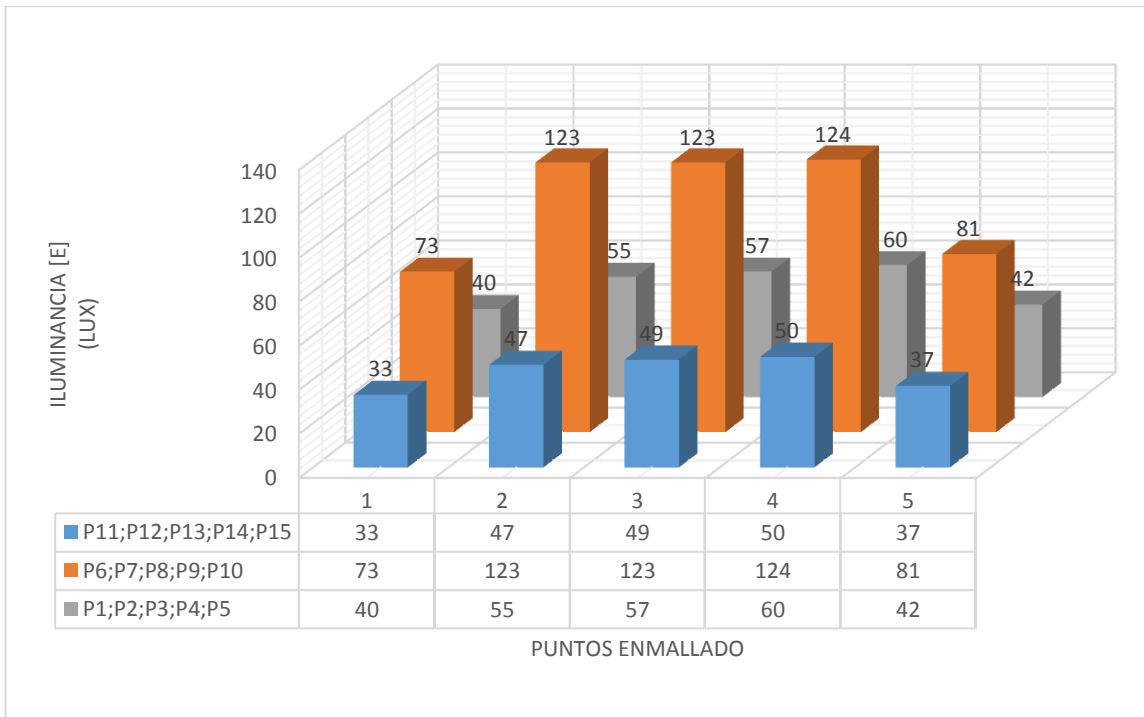


Figura E.4. Representación 3D, E, aula IE 402, 3:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

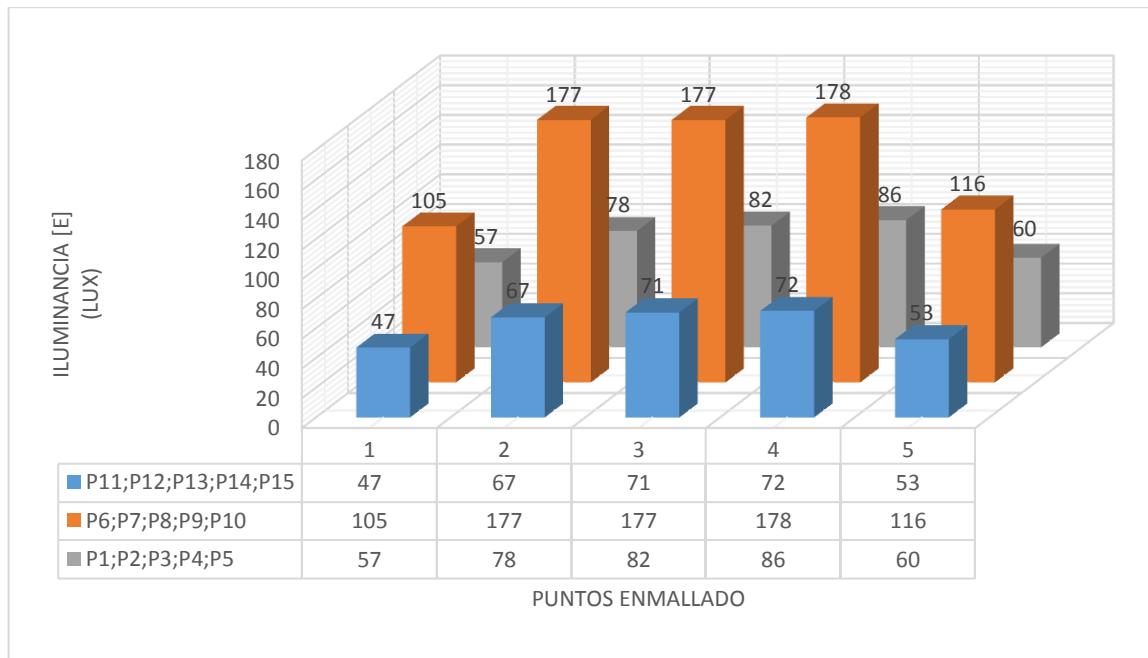


Figura E.5. Representación 3D, E, aula IE 402, 4:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

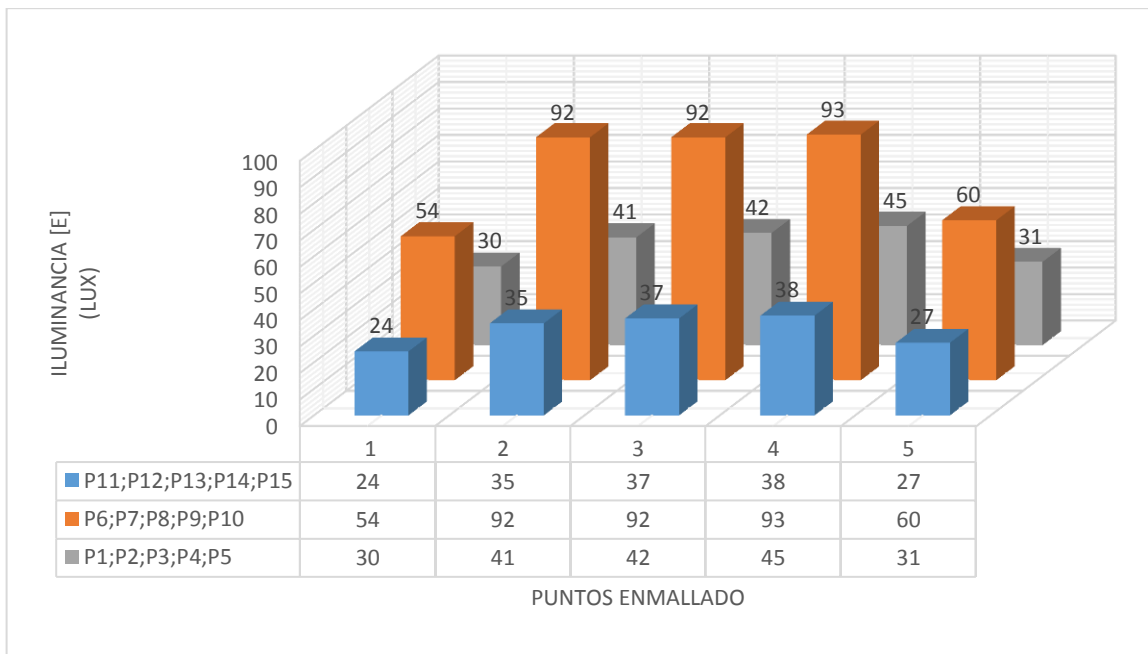


Figura E.6. Representación 3D, E, aula IE 402, 5:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

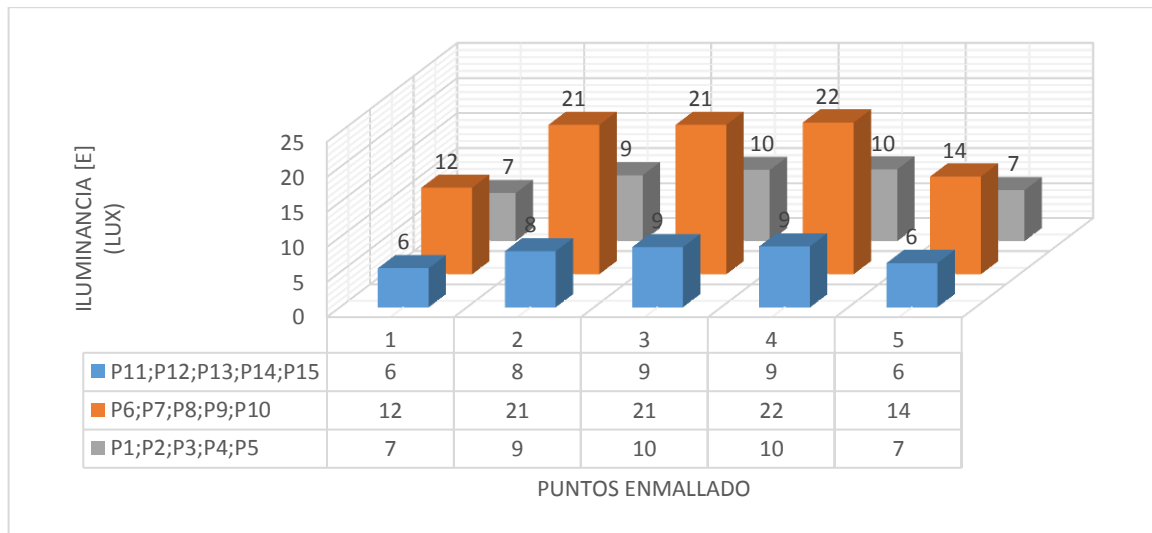


Figura E.7. Representación 3D, E, aula IE 402, 11:00 AM, respecto a la radiación en la terraza

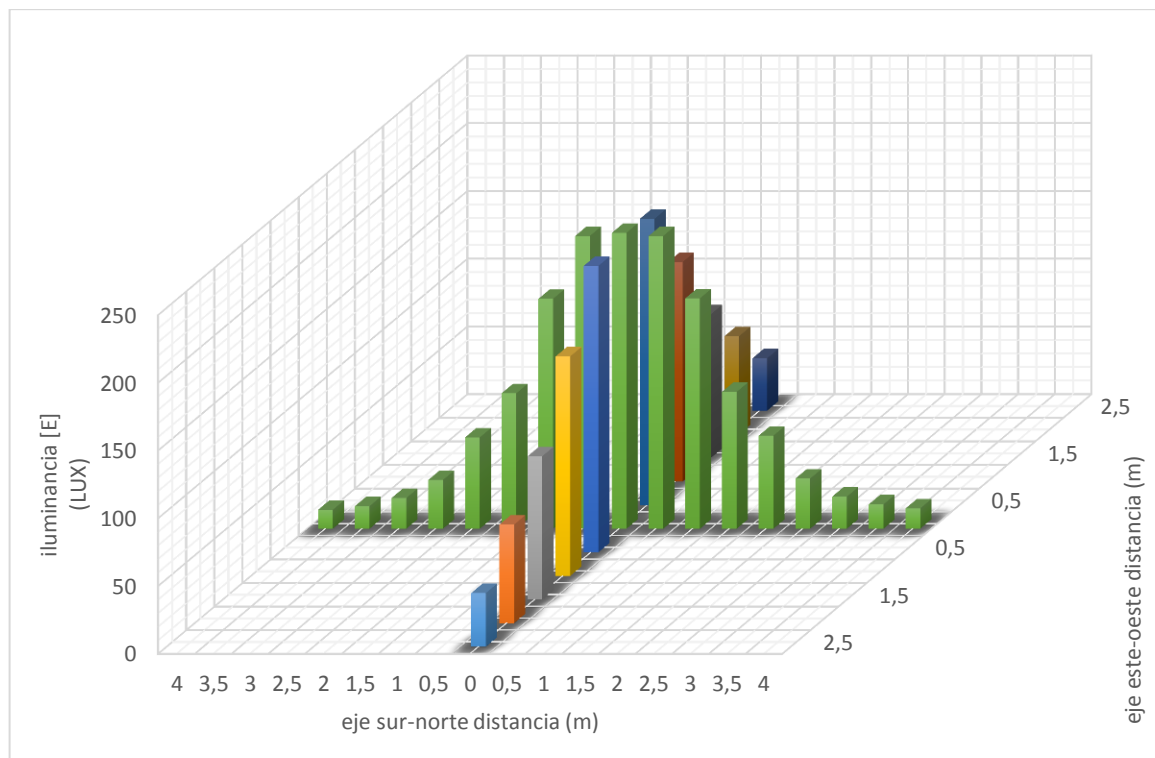


Figura E.8. Representación 3D, E, aula IE 402, 1:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

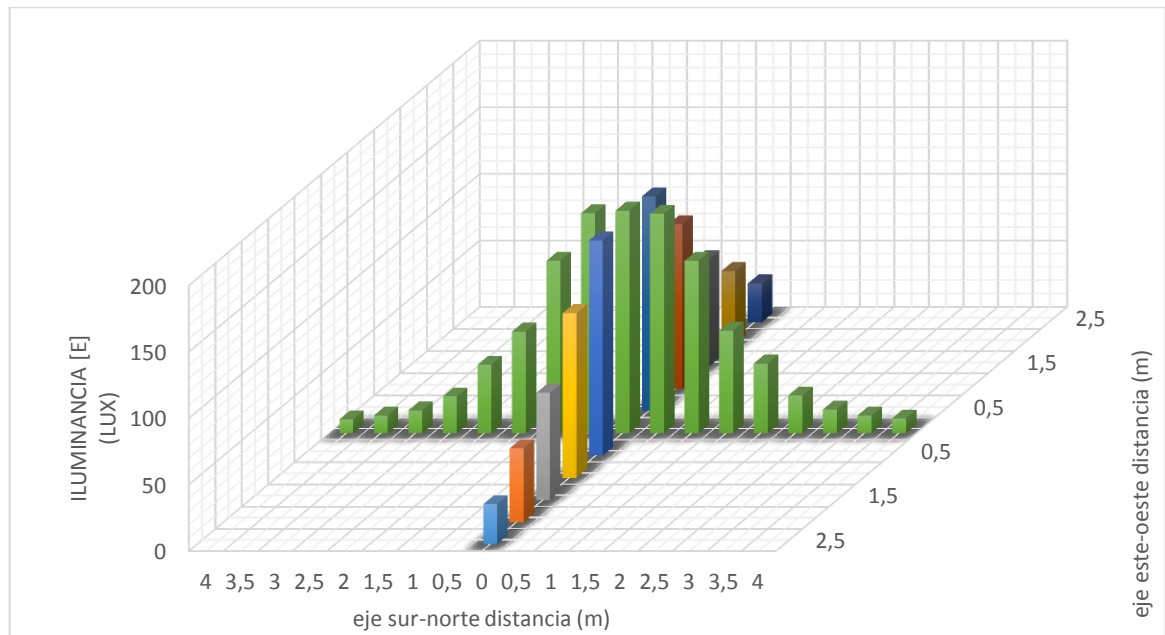


Figura E.9. Representación 3D, E, aula IE 402, 2:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

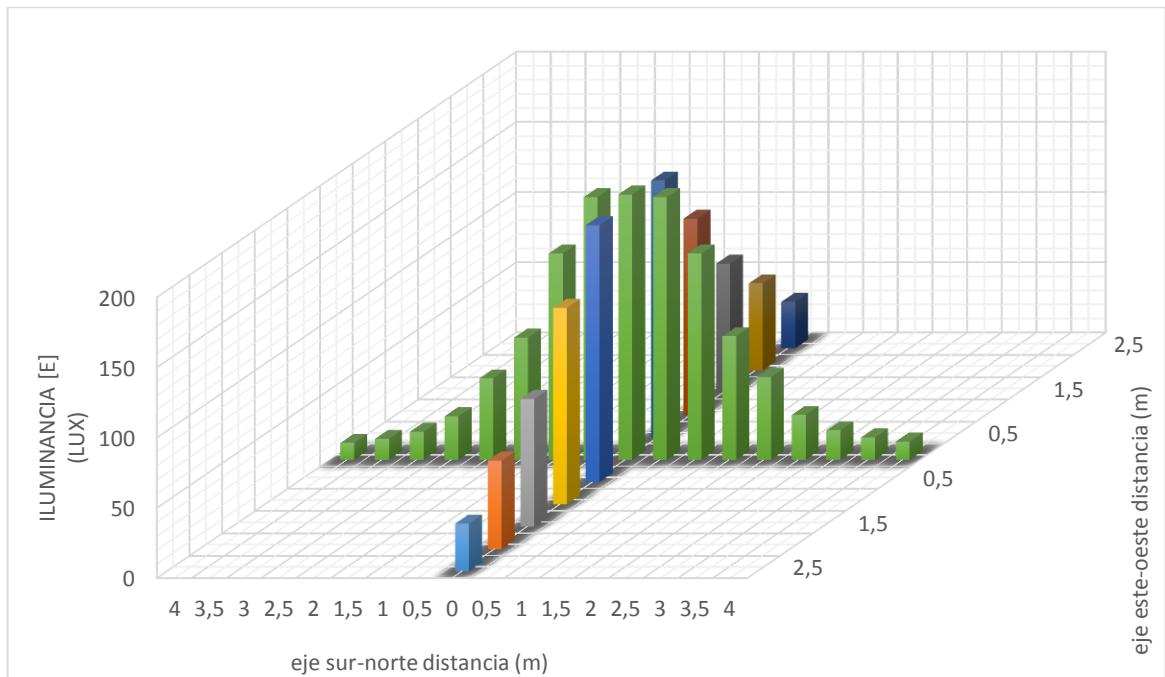


Figura E.10. Representación 3D, E, aula IE 402, 3:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

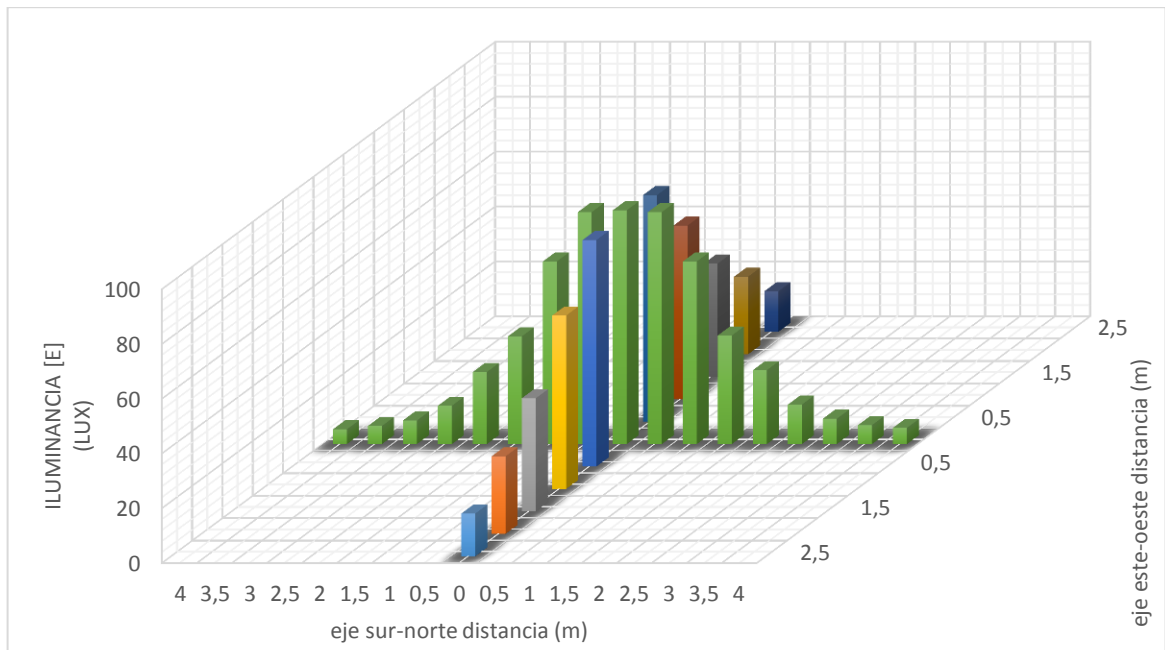
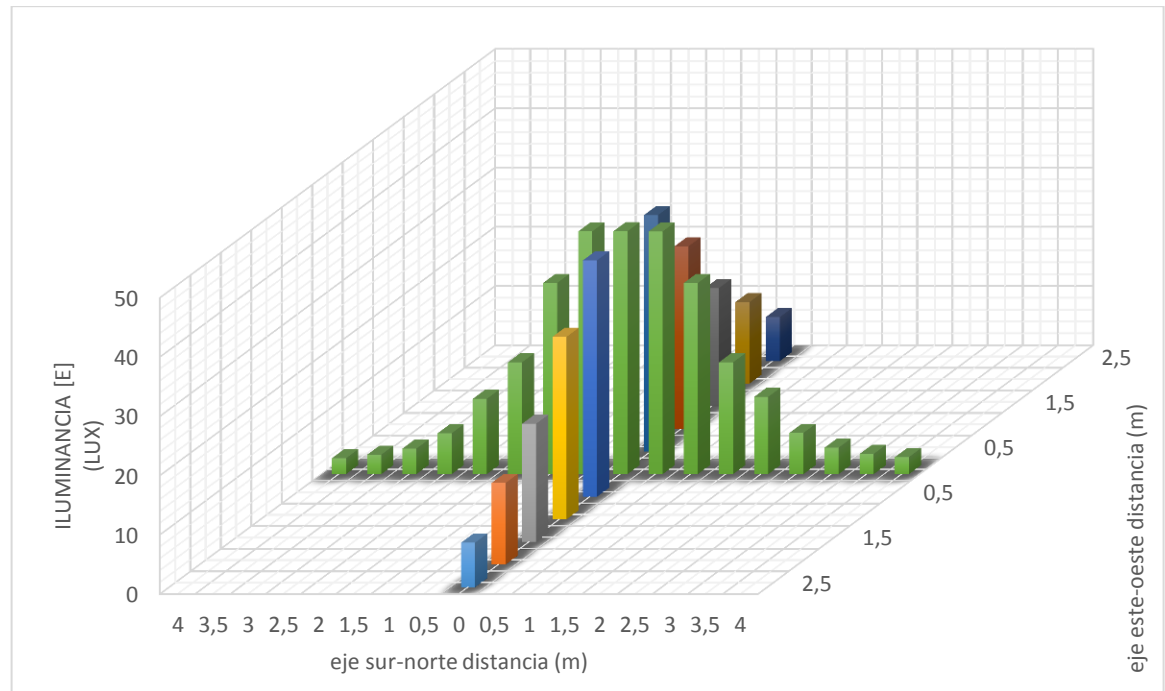


Figura E.11. Representación 3D, E, aula IE 402, 4:00 PM, respecto a la radiación en la terraza



**Curvas características aportadas por el tubo solar ubicado en la parte norte del aula multipropósito IE 402**

Figura E.12. Representación 3D, E, aula IE 402, 11:00 AM, respecto a la radiación en la terraza

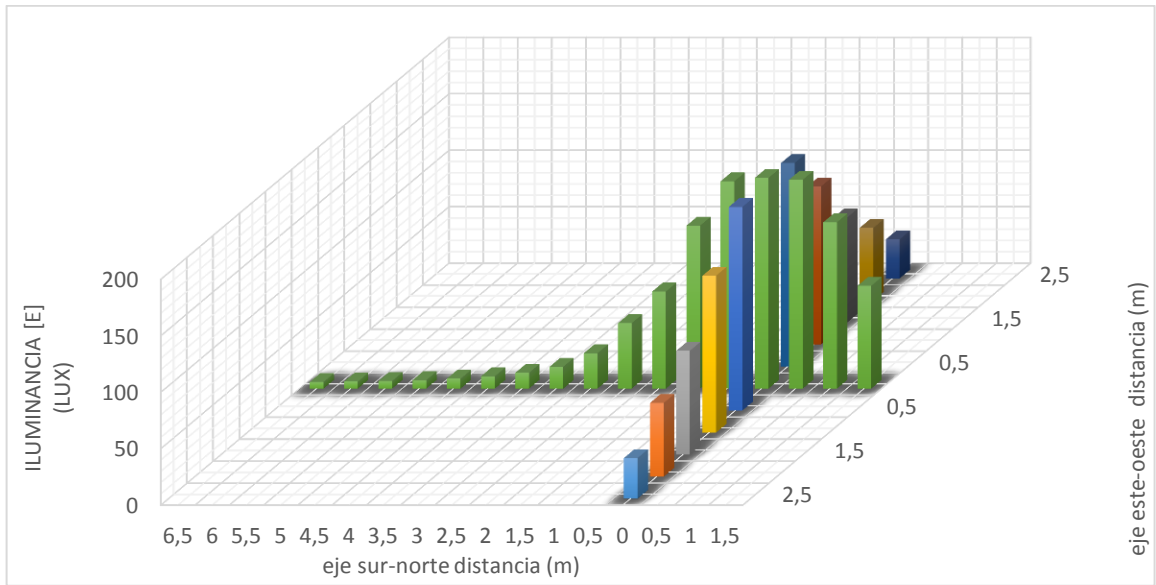


Figura E.13. Representación 3D, E, aula IE 402, 1:00 PM, respecto a la radiación en la terraza

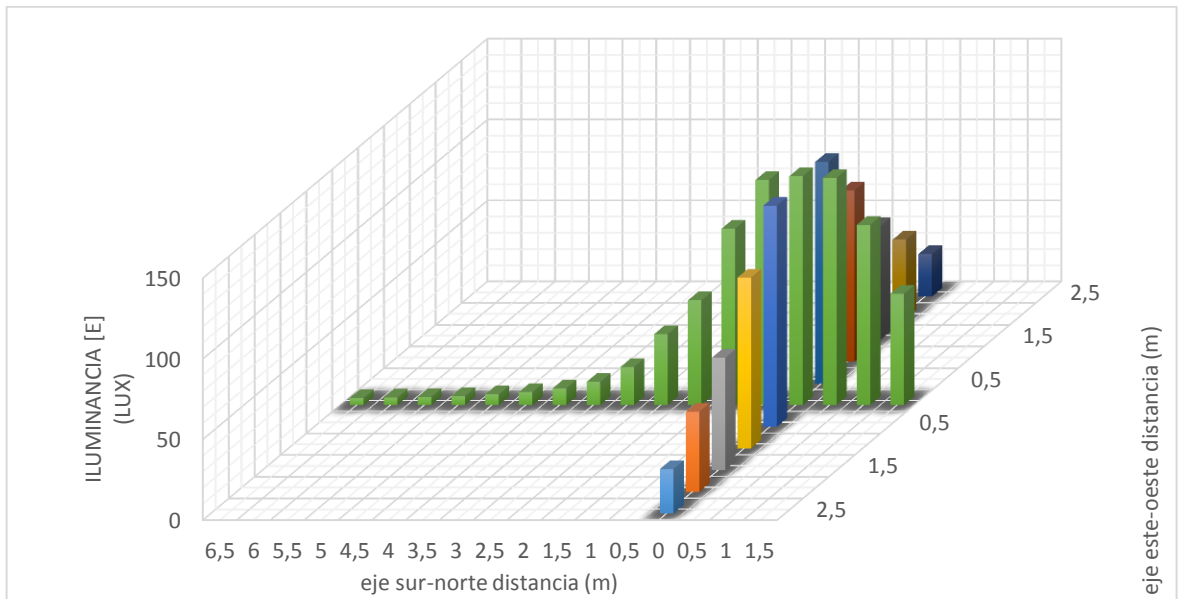


Figura E.14. Representación 3D, E, aula IE 402, 2:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.

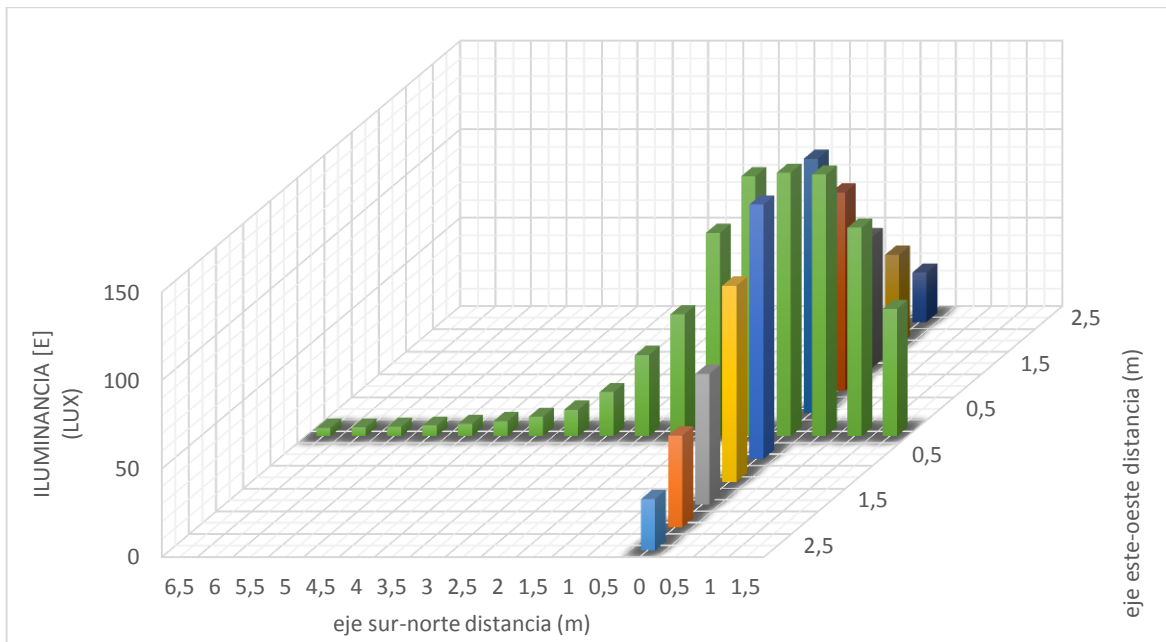
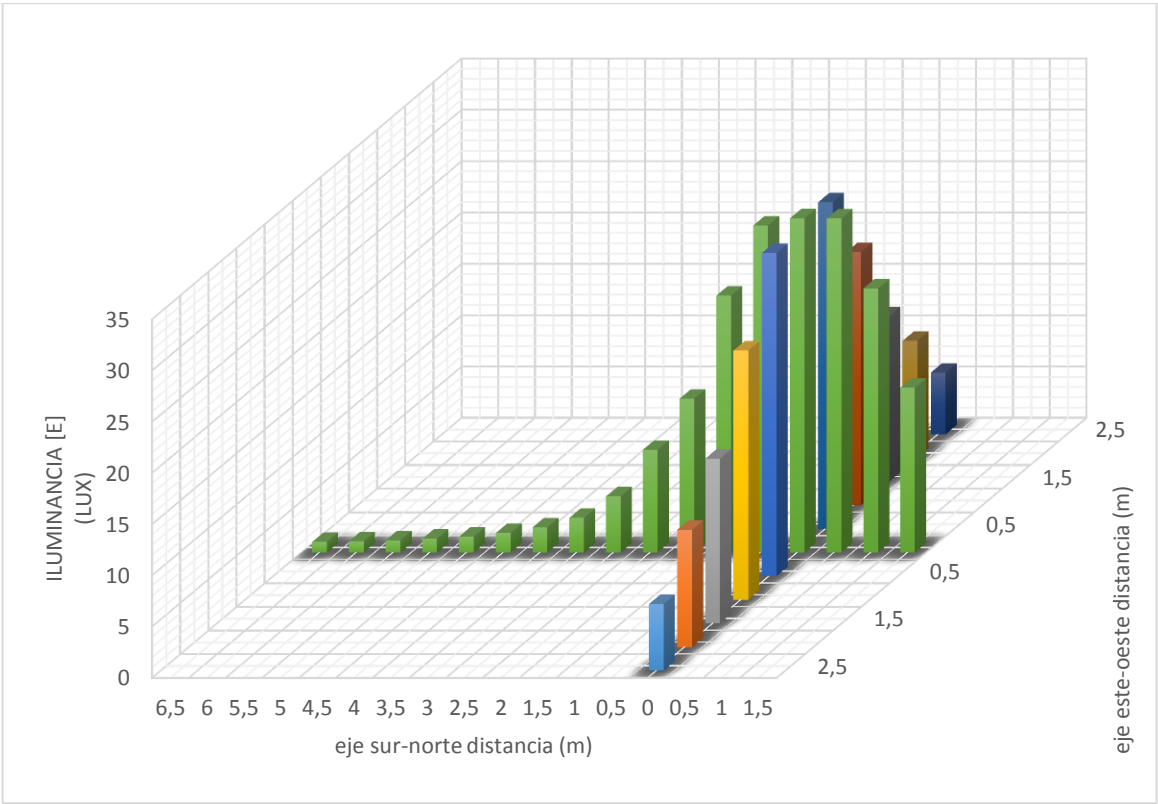


Figura E.15. Representación 3D, E, aula IE 402, 3:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.



Figura E.16. Representación 3D, E, aula IE 402, 4:00 PM, respecto a la radiación en la terraza.



## ANEXO F. COMPARACIÓN RESULTADOS OBTENIDOS DE DF (MEDICIÓN-SIMULACIÓN)

La comparación de los resultados obtenidos mediante mediciones en sitio y simulaciones en DIALux, del comportamiento de la luz diurna dentro del aula multipropósito IE 402, aportada por los tubos solares, respecto a la incidencia solar en la terraza, se representa mediante el conjunto de Figuras que se presentan a continuación, las cuales se describen mediante el Df (daylight factor) en función de los puntos del enmallado.

Figura F.1 Df, aula IE 402, 11:00 am, respecto a la radiación en la terraza.

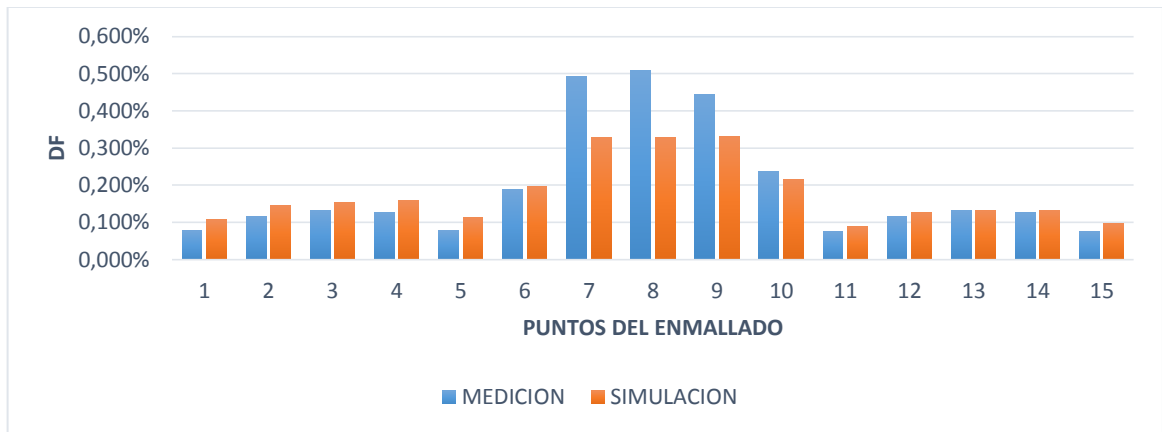


Figura F.2 Curva Df, aula IE 402, 11:00 am, respecto a la radiación en la terraza.

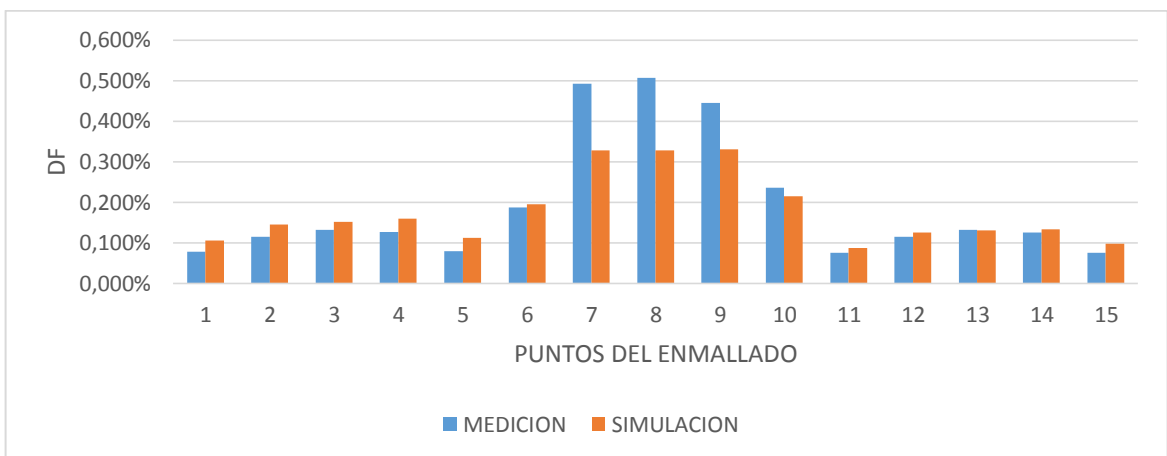


Figura F.3 Df, aula IE 402, 1:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

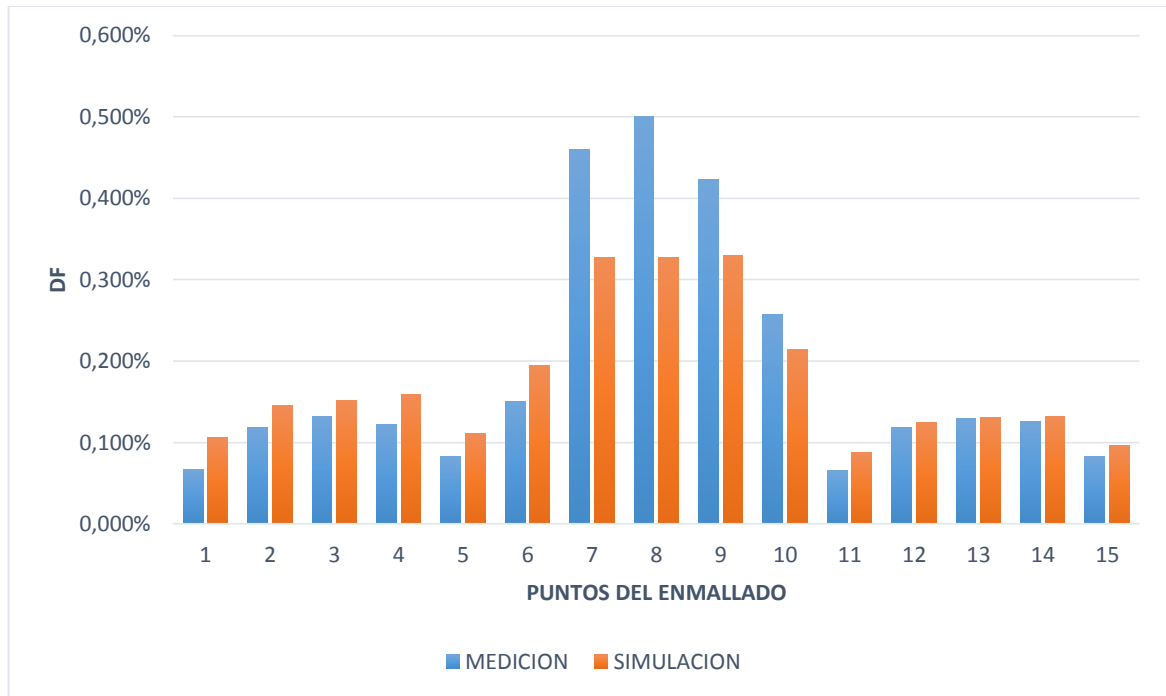


Figura F.4 Curva Df, aula IE 402, 1:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

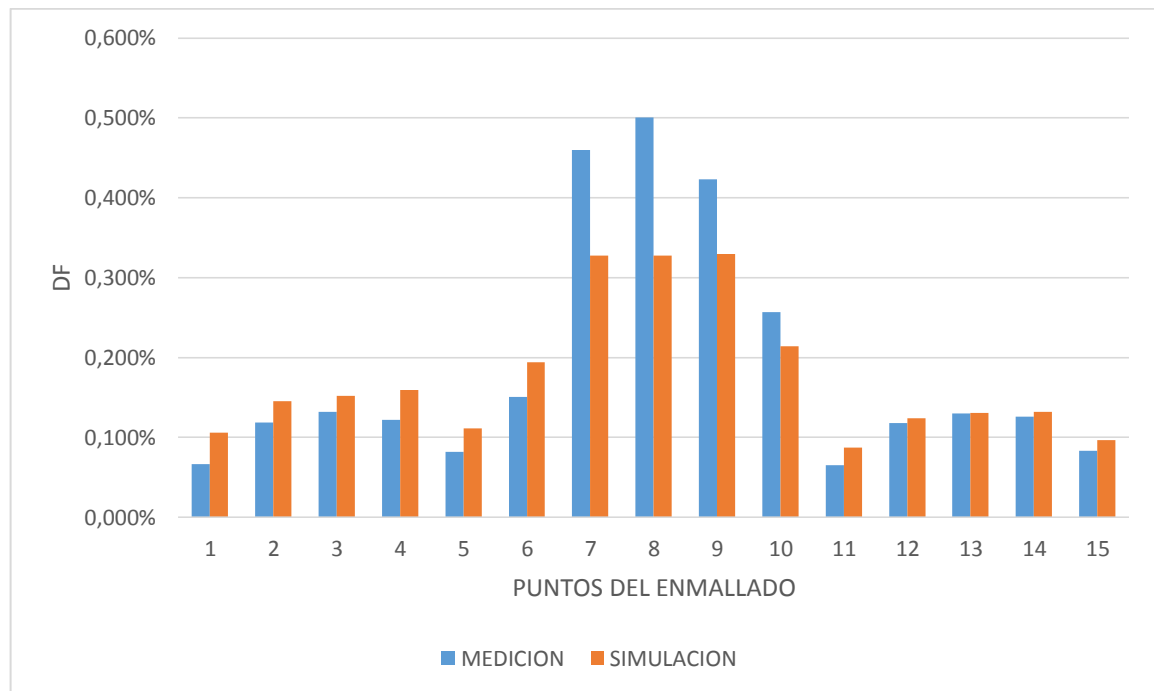


Figura F.5 Df, aula IE 402, 2:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

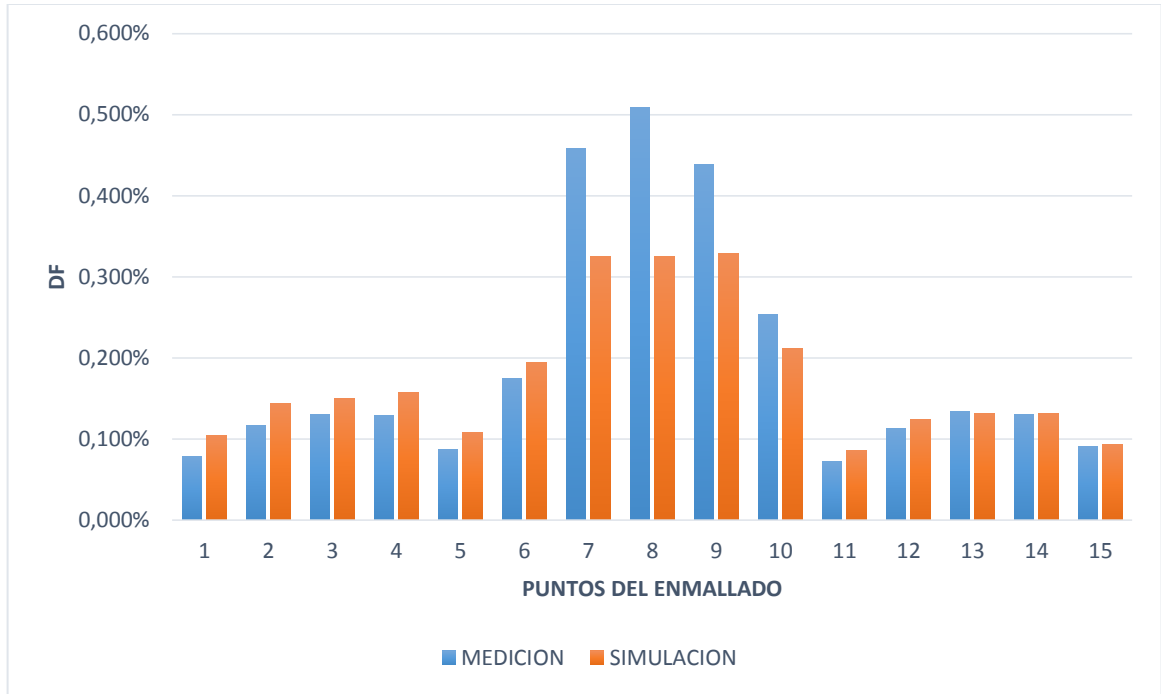


Figura F.6 Curva Df, aula IE 402, 2:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

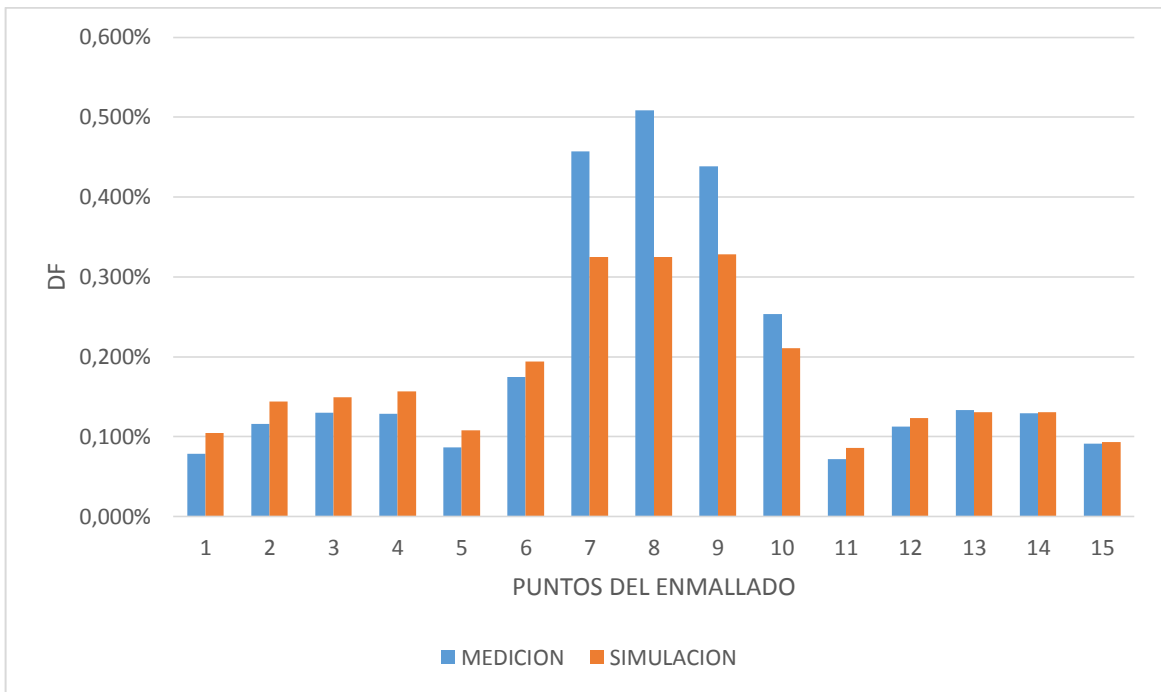


Figura F.7 Df, aula IE 402, 3:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

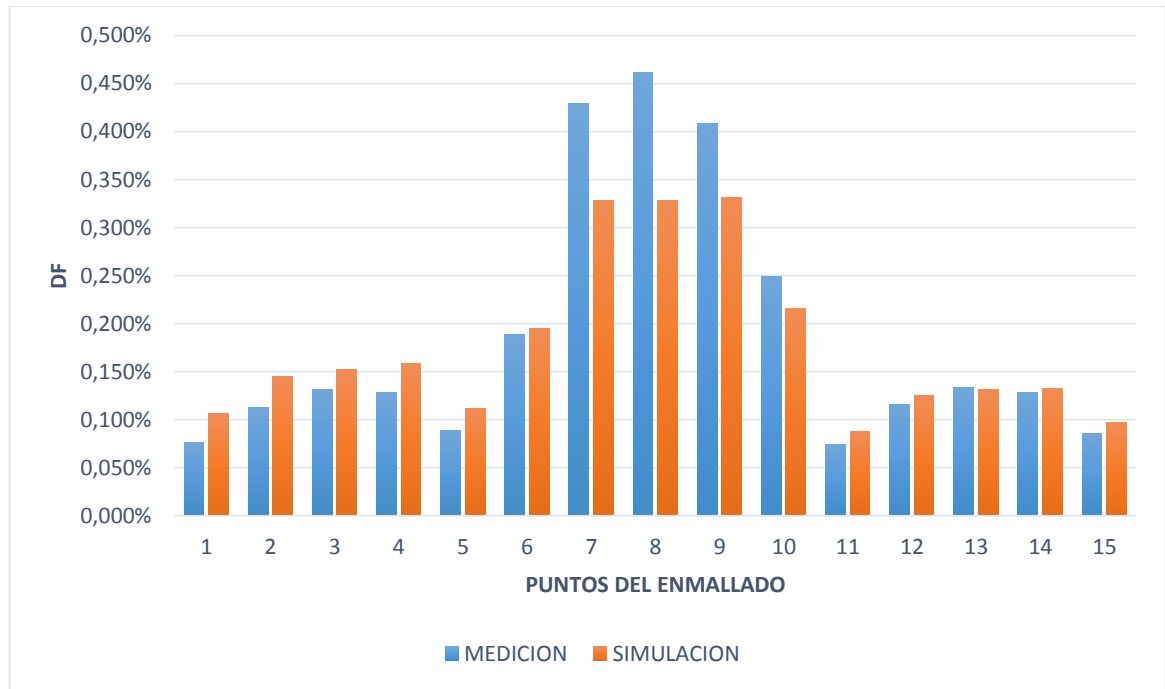


Figura F.8 Curva Df, aula IE 402, 3:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

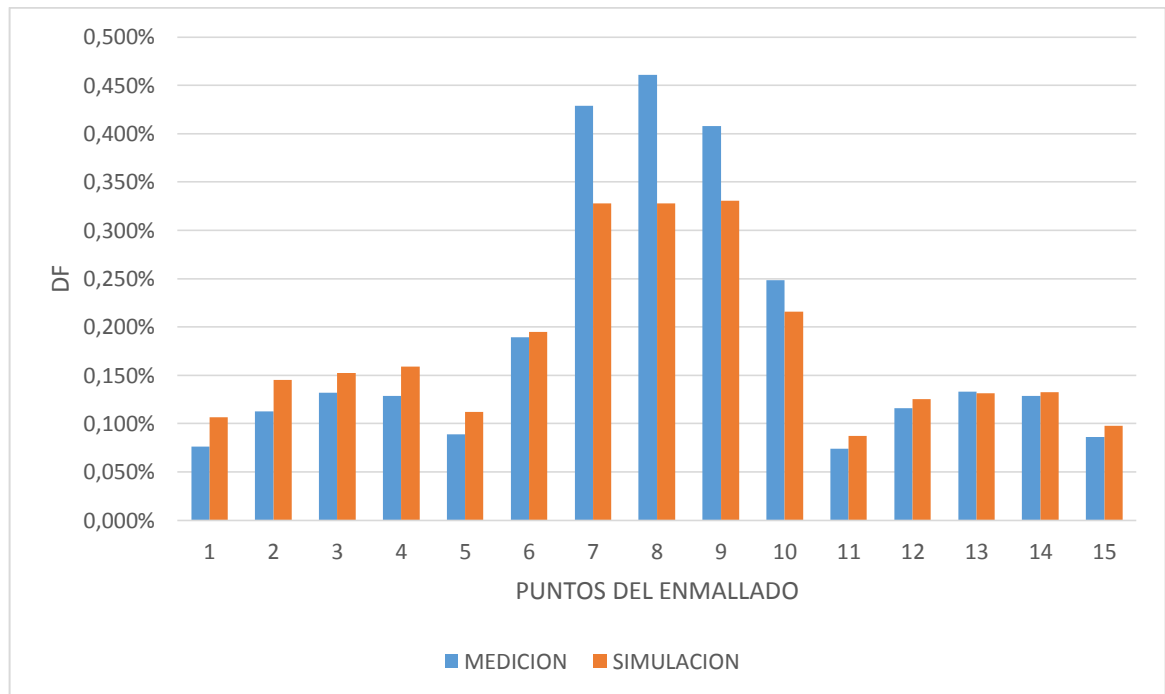


Figura F.9 Df, aula IE 402, 4:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

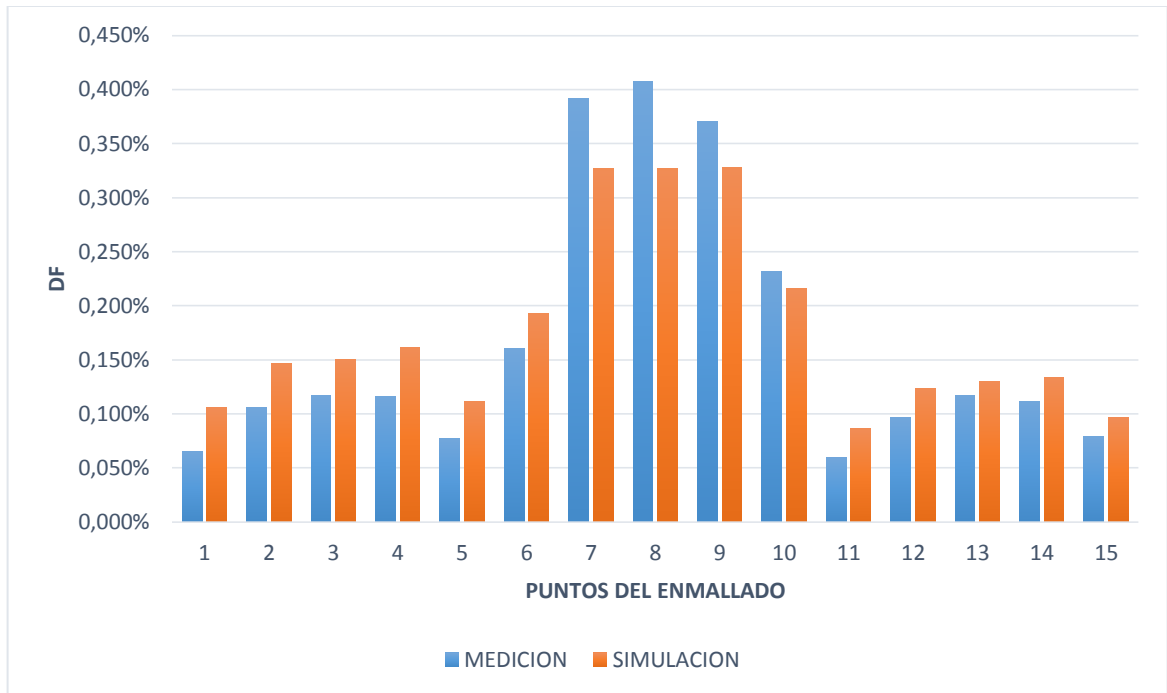


Figura F.10 Curva Df, aula IE 402, 4:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

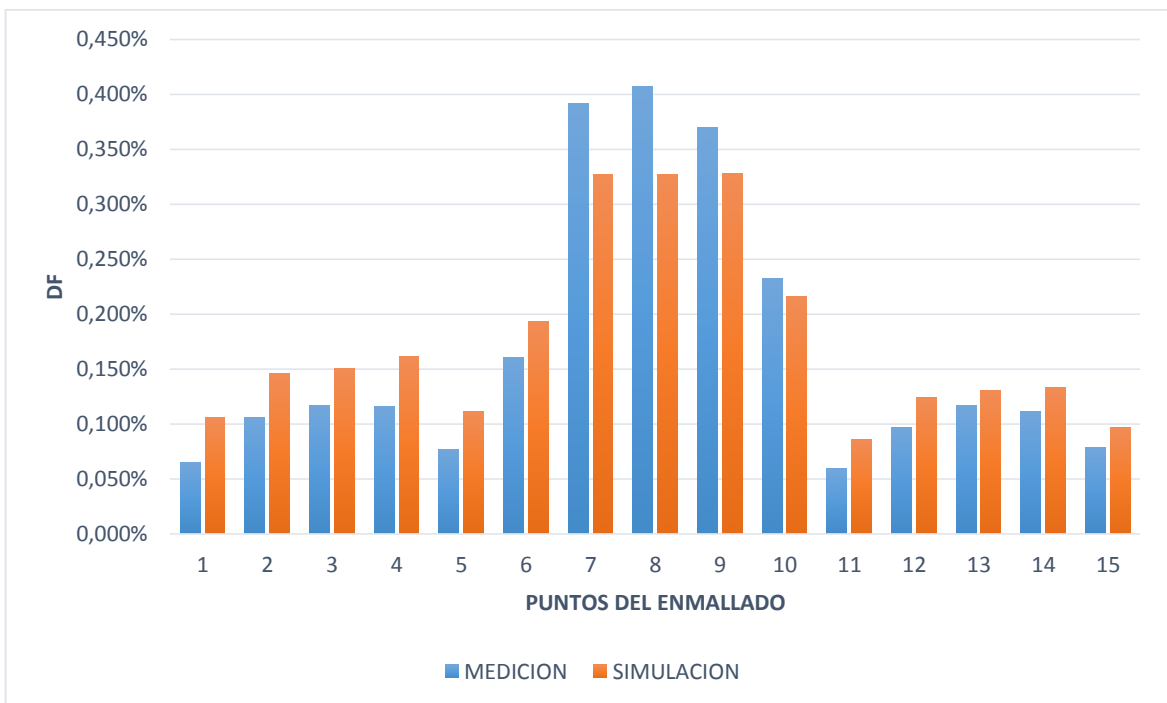


Figura F.11 Df, aula IE 402, 5:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

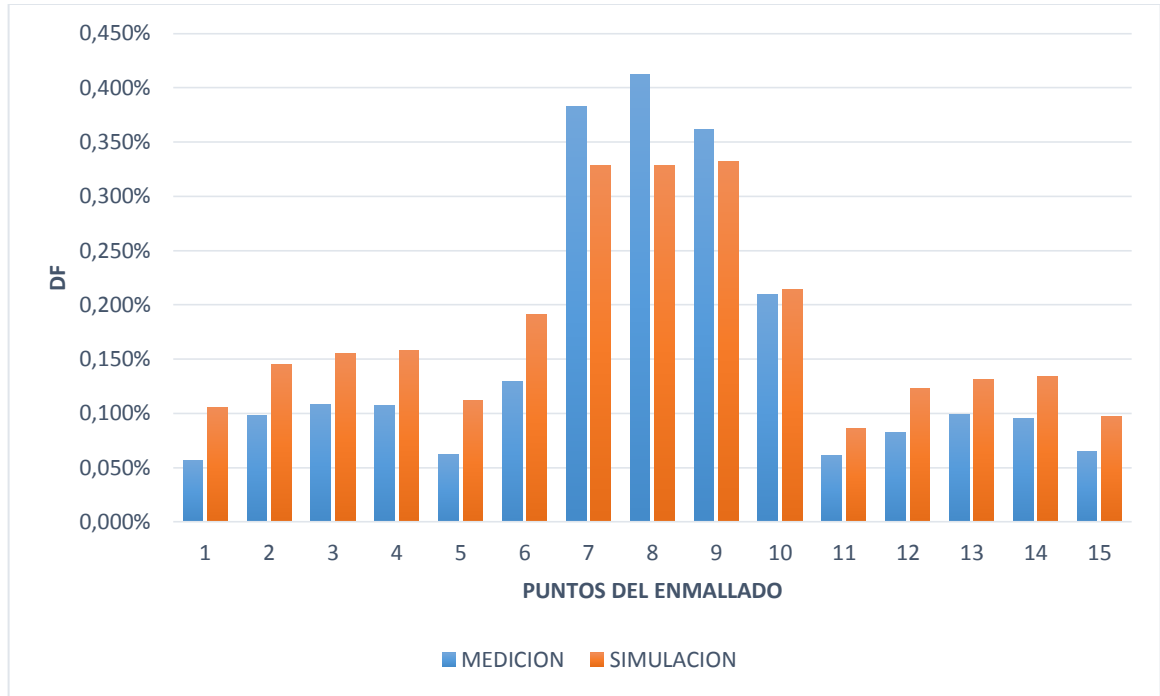
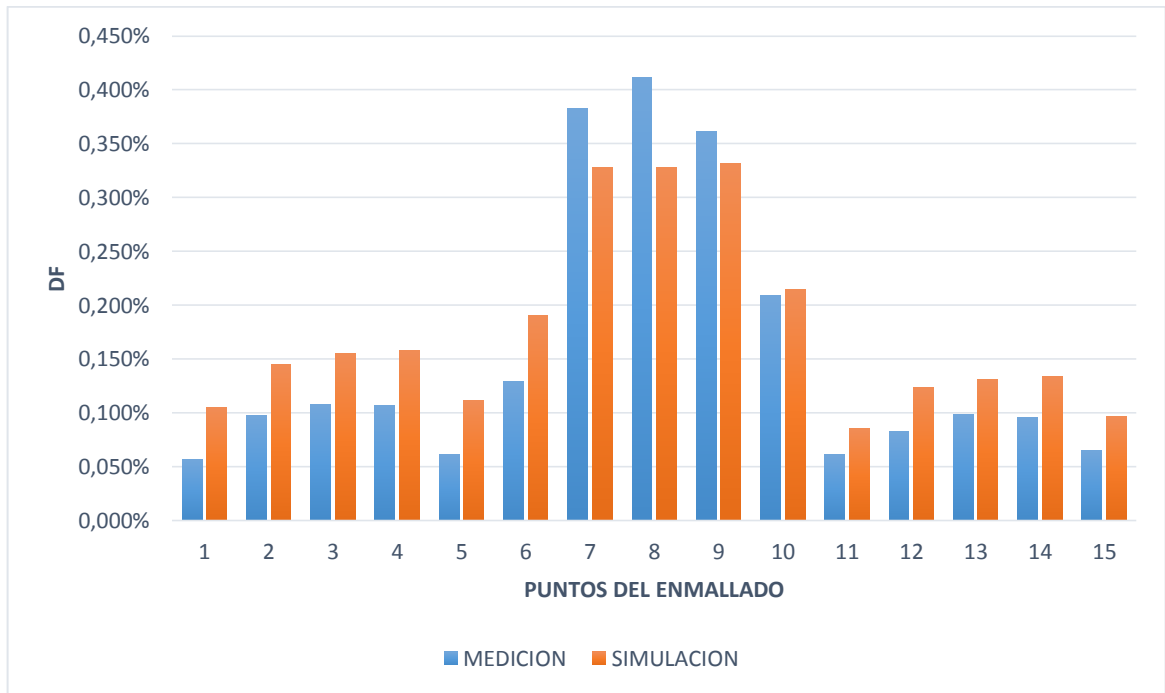


Figura F.12 Curva Df, aula IE 402, 5:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.



## ANEXO G. COMPARACIÓN RESULTADOS OBTENIDOS DE E (MEDICIÓN-SIMULACIÓN)

La comparación de los resultados obtenidos mediante mediciones en sitio y simulaciones en DIALux, del comportamiento de la luz diurna dentro del aula multipropósito IE 402, aportada por los tubos solares, respecto a la incidencia solar en la terraza, se representa mediante el conjunto de Figuras que se presentan a continuación, las cuales se describen mediante la iluminancia (E) en función de los puntos del enmallado.

Figura G.1 E, aula IE 402, 11:00 am, respecto a la radiación en la terraza.

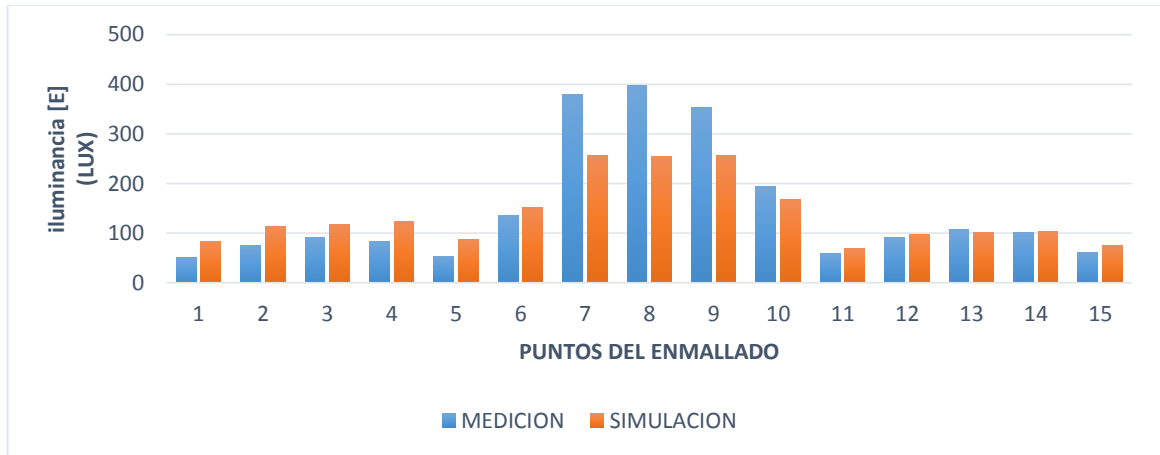


Figura G.2 Curva E, aula IE 402, 11:00 am, respecto a la radiación en la terraza.

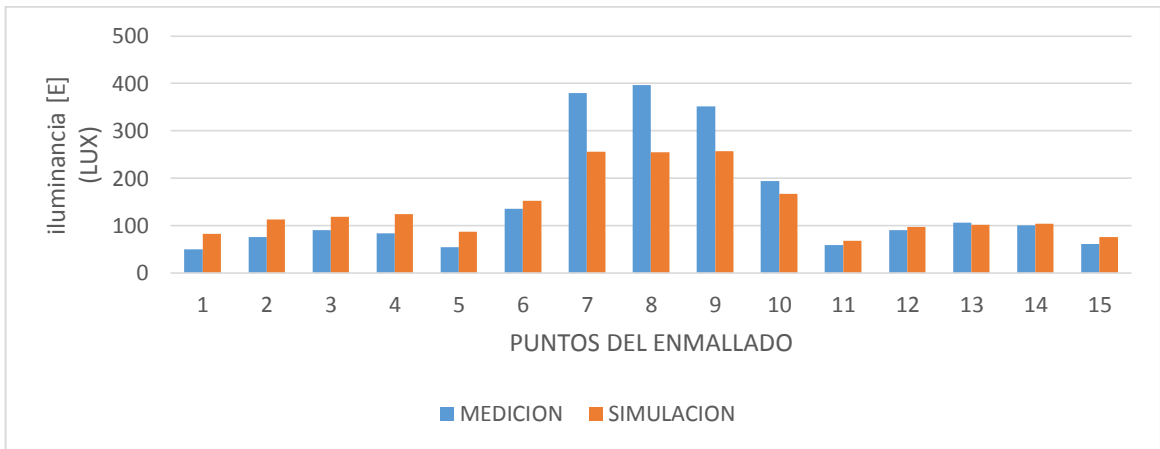


Figura G.3 E, aula IE 402, 1:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

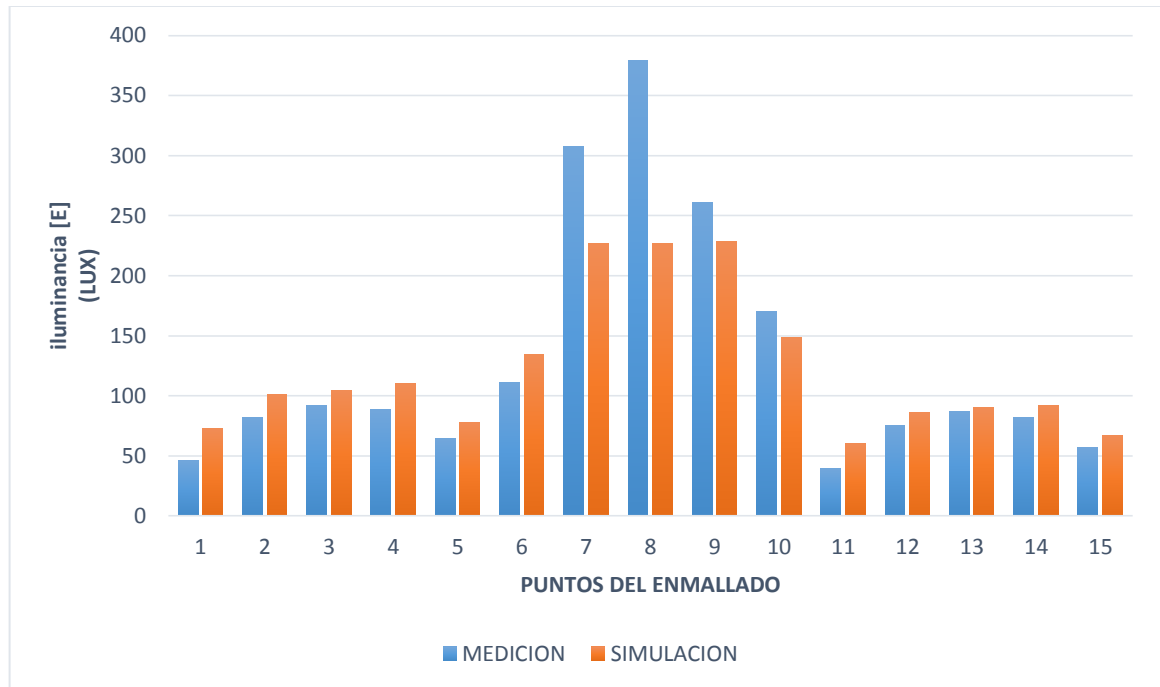


Figura G.4 Curva E, aula IE 402, 1:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

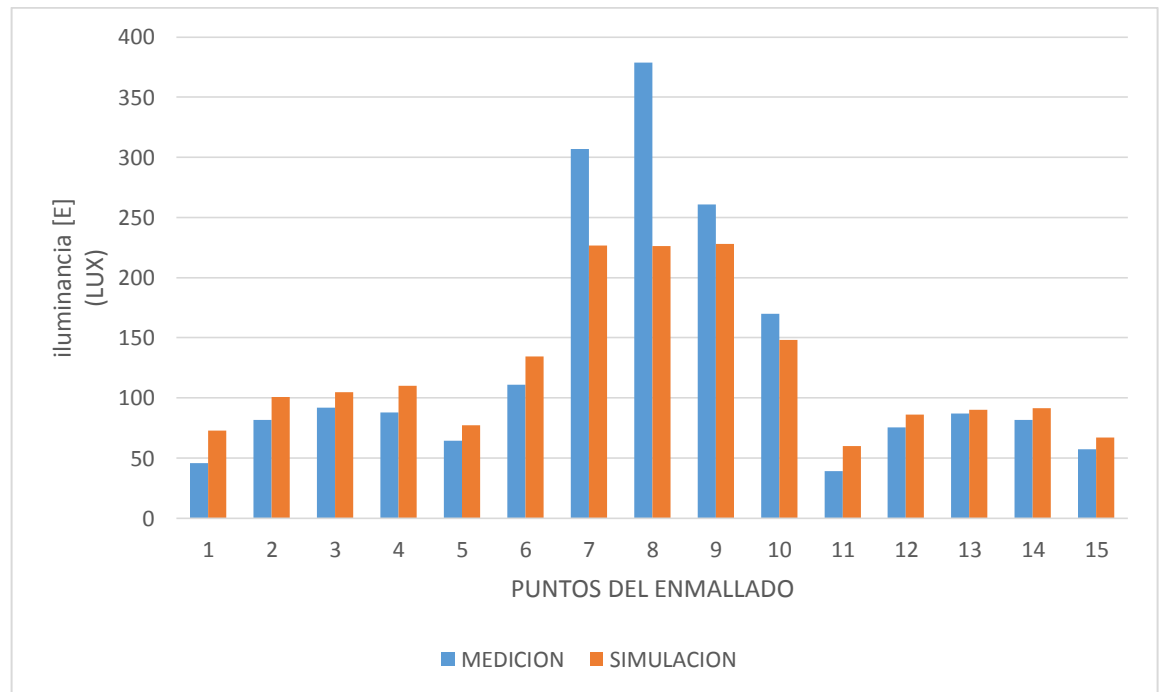


Figura G.5 E, aula IE 402, 2:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

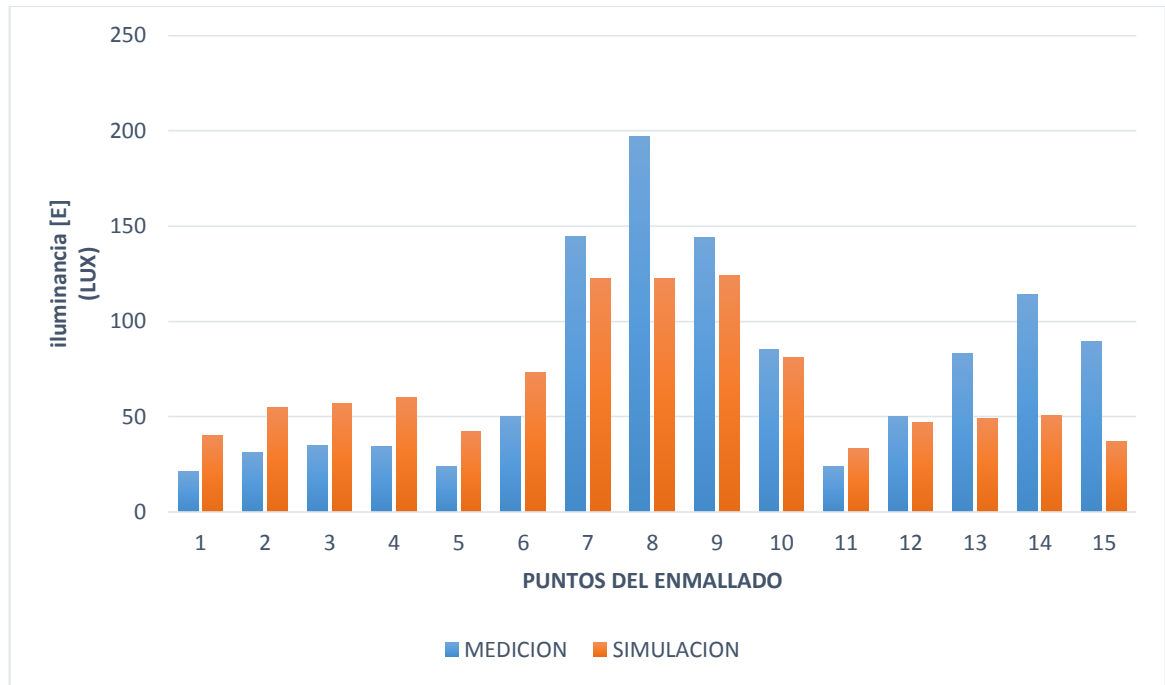


Figura G.6 Curva E, aula IE 402, 2:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

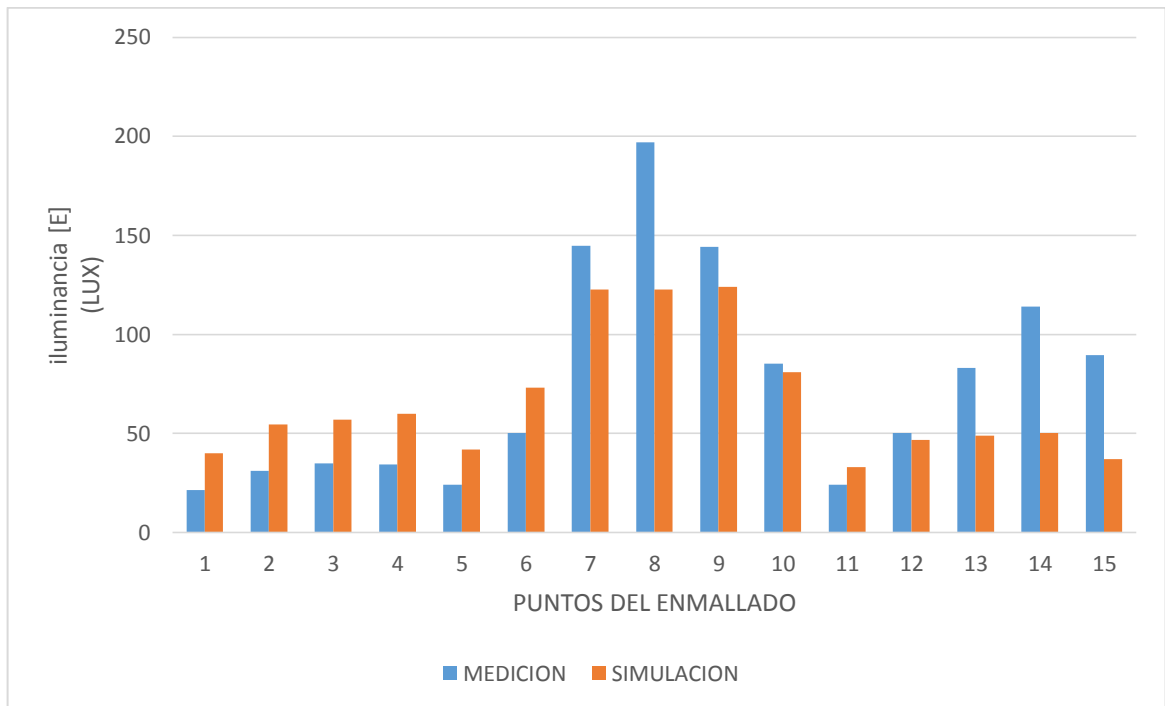


Figura G.7 E, aula IE 402, 3:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

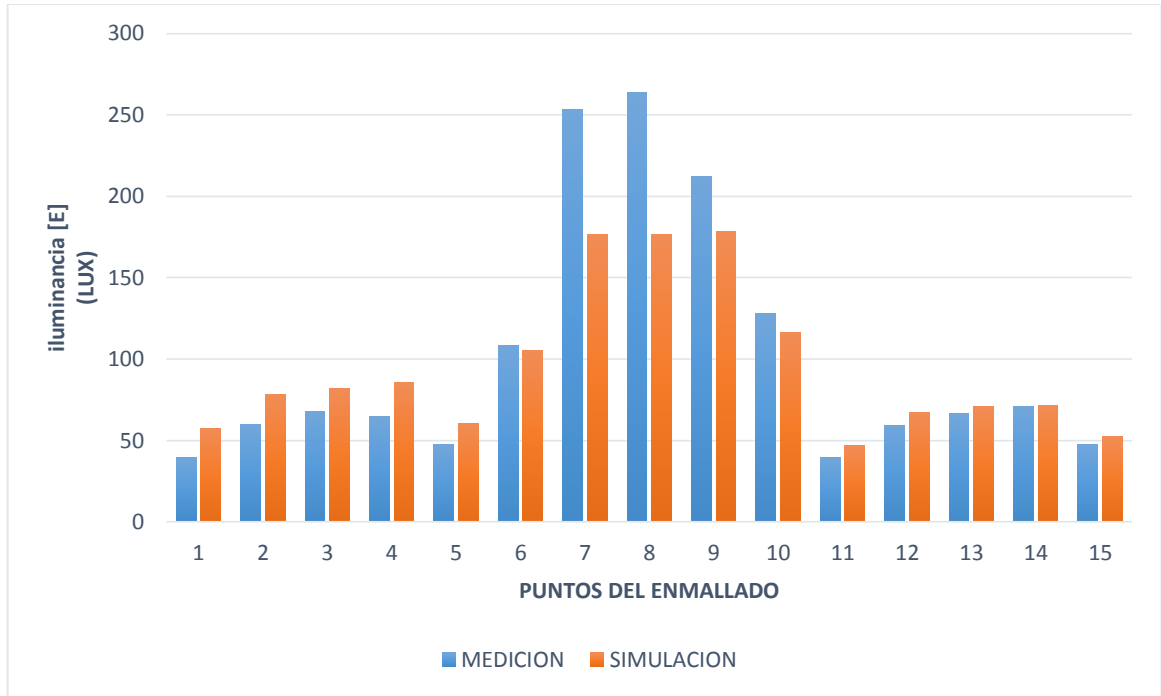


Figura G.8 Curva E, aula IE 402, 3:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

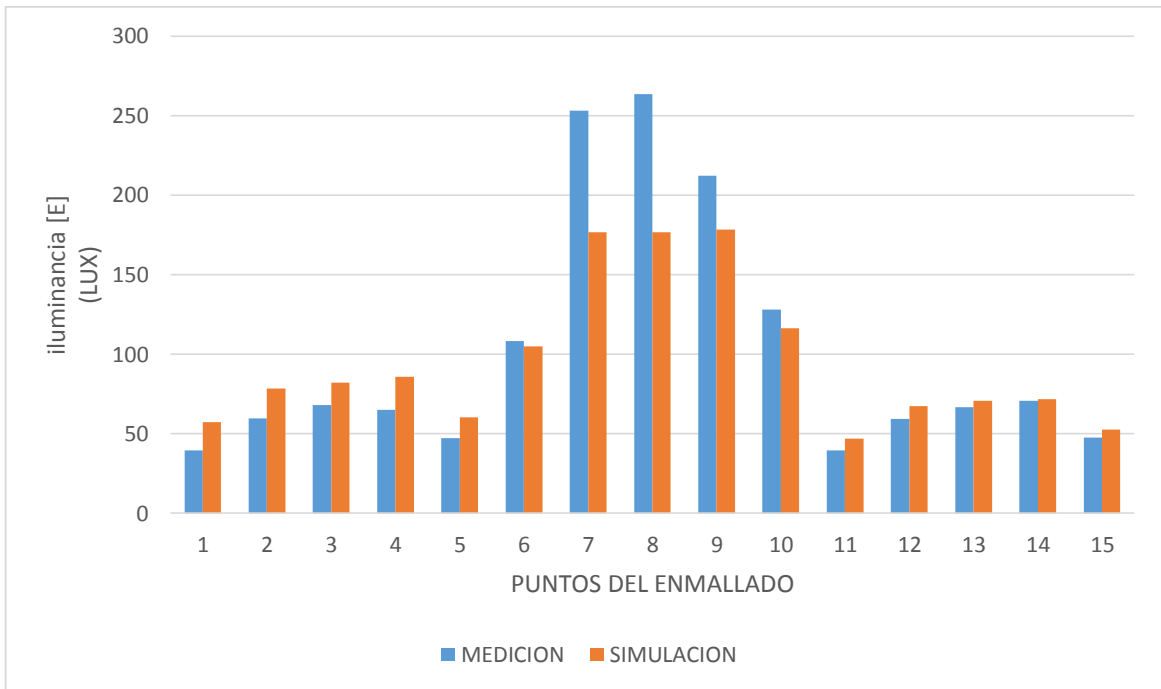


Figura G.9 E, aula IE 402, 4:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

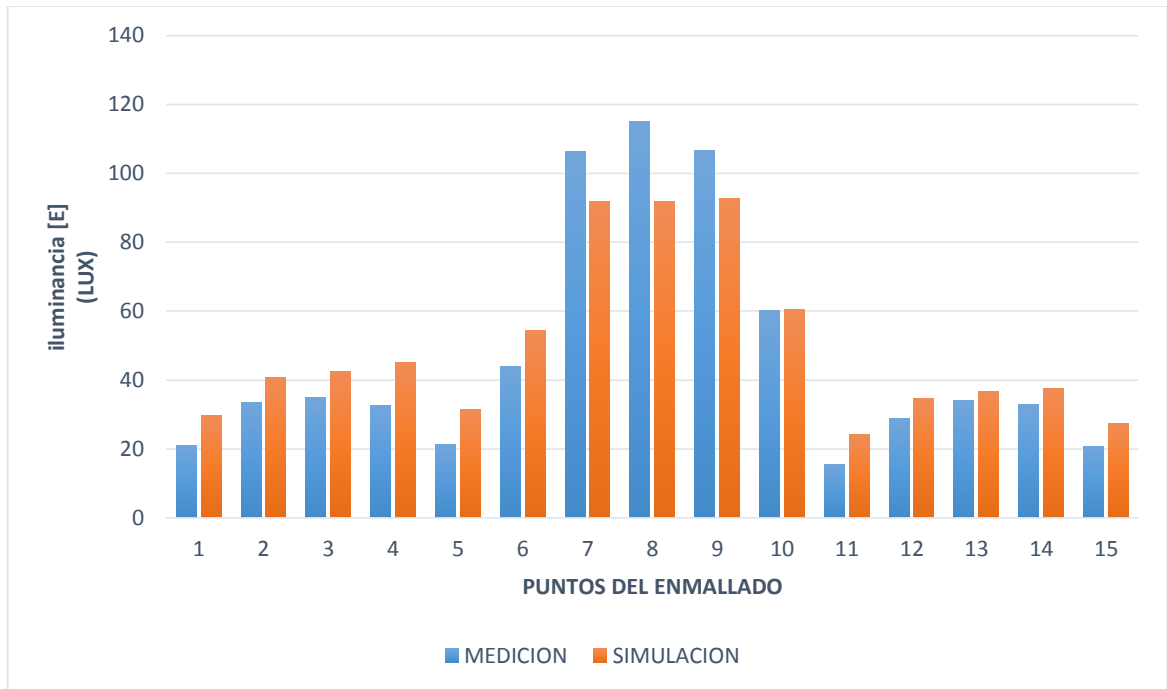


Figura G.10 Curva E, aula IE 402, 4:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

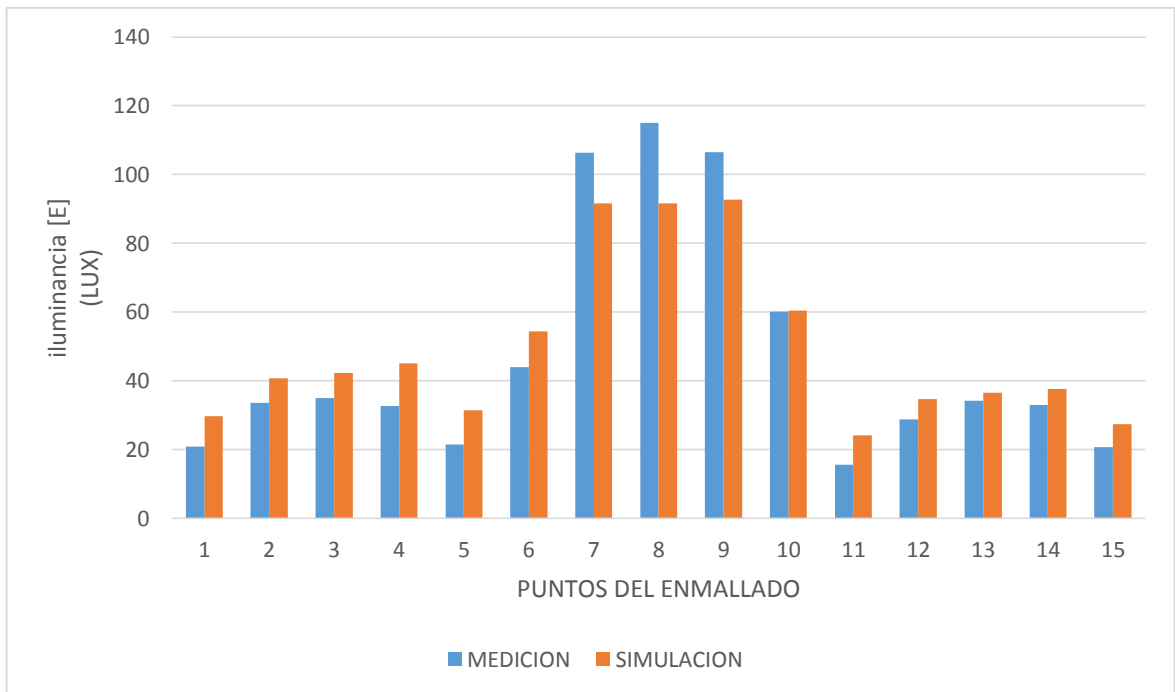


Figura G.11 E, aula IE 402, 5:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.

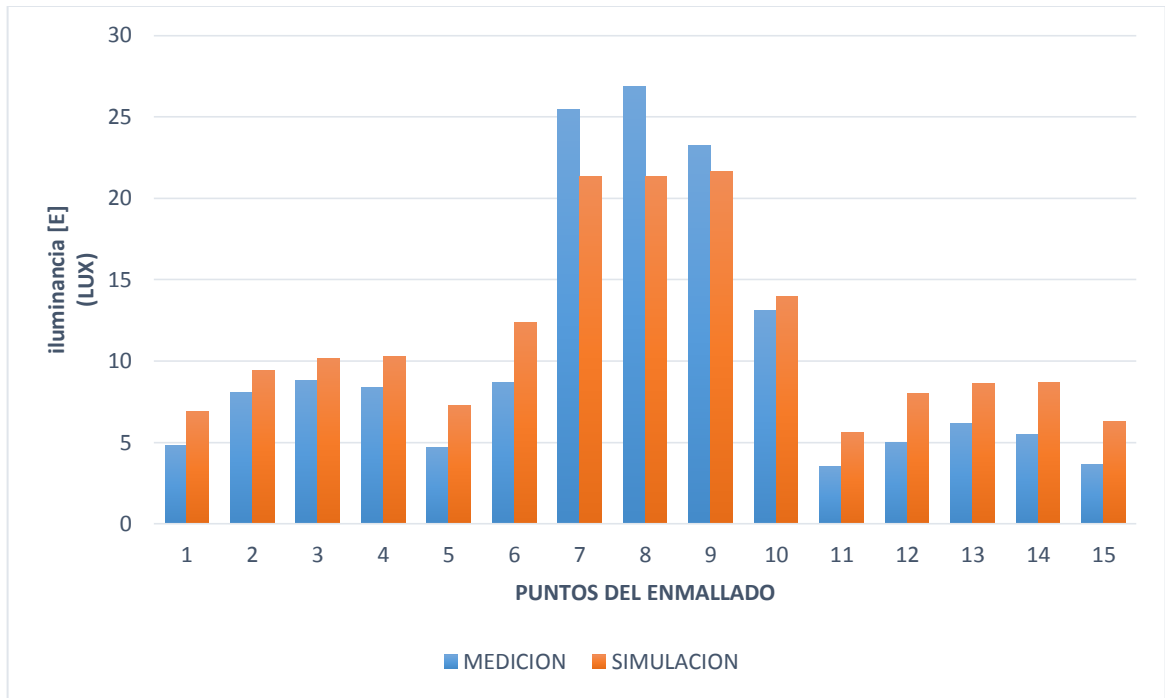
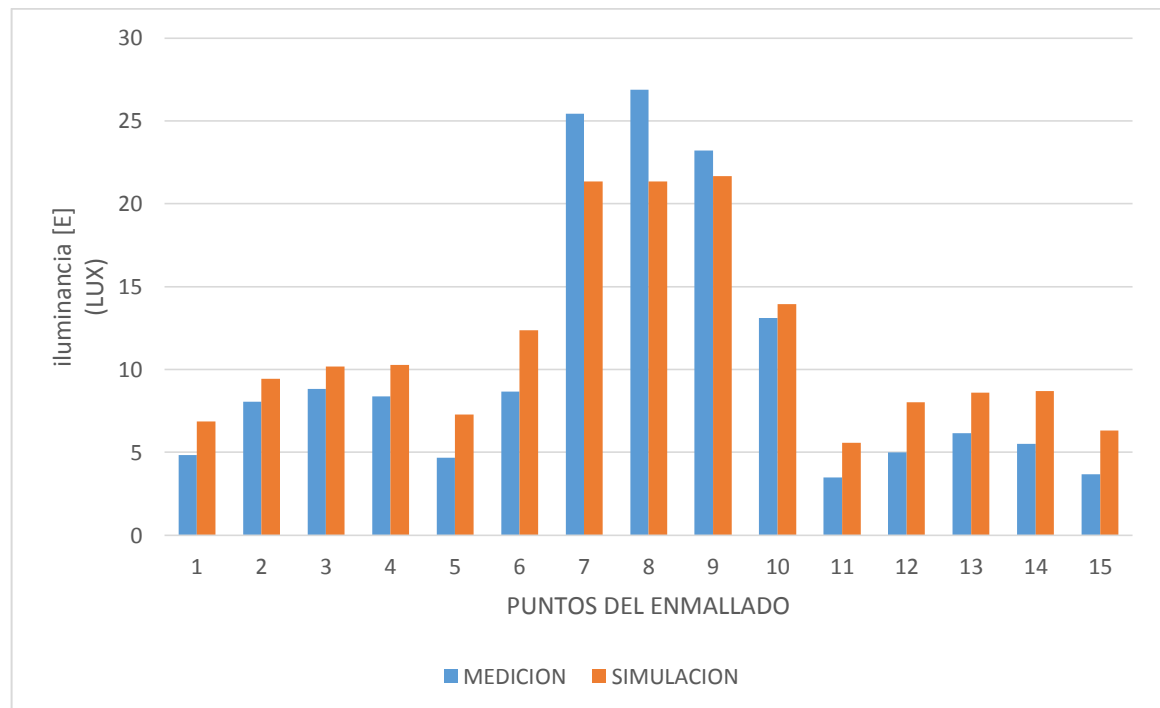


Figura G.12 Curva E, aula IE 402, 5:00 pm, respecto a la radiación en la terraza.



## ANEXO H. CALCULO DE LA INCERTIDUMBRE EN EL PROCESO DE MEDIDA

Es necesario realizar la estimación de la incertidumbre asociada a los resultados obtenidos en el espacio caracterizado, con el fin de que quienes utilicen los datos mostrados en este trabajo de grado puedan evaluar la idoneidad de la medición. Es conveniente que el resultado de la medida vaya acompañado de alguna indicación cuantitativa de la calidad del resultado. Para que las mediciones puedan compararse entre sí y con otros valores de referencia.

### Método de cálculo y expresiones matemáticas

En la actualidad, la mayoría de los organismos de metrología, incluyendo a los laboratorios nacionales de cada país, han adoptado el método recomendado por BIPM (Buró Internacional de Pesas y Medidas) el cuál se explica en la Guide to expression of uncertainty in measurement (López y col., 1994).

Para el cálculo de la incertidumbre en base a esta guía, se debe primeramente definir el mensurando, en donde se incluyan todos los factores de los que depende. En el caso de la Central de Instrumentación el mensurando es la matriz agua. Posteriormente establecer el modelo matemático que representa el proceso de medición, esto es expresar la relación entre el mensurando y las variables de las que depende, implica enlistar todos los factores que influyen en la medición [32].

La incertidumbre del resultado de una medición, por lo general, consiste en varios componentes, los cuales, en la guía ya mencionada se agrupan de acuerdo a las dos categorías tipo A ( $\mu_A$ ) y tipo B ( $\mu_B$ ). Las expresiones matemáticas para el cálculo de la incertidumbre tipo A y tipo B se muestran a continuación para el caso de un modelo matemático con dos variables:

$$\mu_A = \sqrt{(\sigma_1 * Coe_{sen1})^2 + (\sigma_2 * Coe_{sen2})^2 + 2 * Coe_{corr1-2} * \sigma_1 * \sigma_2 * Coe_{sen1} * Coe_{sen2}}$$

$$\mu_B = \sqrt{Coe_{sen1} * \frac{\%precision1}{\sqrt{3}} + Coe_{sen1} * \frac{\%resolucion1}{\sqrt{3}} + Coe_{sen2} * \frac{\%precision2}{\sqrt{3}} + Coe_{sen2} * \frac{\%resolucion2}{\sqrt{3}}}$$

Dónde:

$\sigma_i$ : Desviación estándar de la variable i del modelo matemático.

$Coe_{corri-j}$ : Coeficiente de correlación entre las variables i y j.

$Coe_{seni}$ : Coeficiente de sensibilidad de la variable i.

$\%precisioni$ : Incertidumbre asociada por la precisión del instrumento de medida.

$\%resolucioni$ : Incertidumbre asociada a la resolución del instrumento de medida.

El modelo matemático para el cálculo de la incertidumbre está dado por:

$$Df = \frac{E_{int}}{E_{ext}}$$

La Tabla H.1 indican los diferentes coeficientes de sensibilidad calculados según el modelo matemático usado para la estimación del Df.

Modelo	Coeficientes de sensibilidad	observaciones
$Df = \frac{p_i}{p_{xj}}$	$\frac{\partial Df}{\partial p_i} = \frac{1}{p_{xj}}$ $\frac{\partial f}{\partial p_j} = -\frac{p_i}{p_{xj}^2}$	El subíndice xj indica los puntos fachadas A1, B1 y C1. i= 1,2,3.... 9 según sea el caso.

Según la hoja de datos del medidor usado con referencia AMPROBE LM-120 se tiene para un rango único de medida que va desde los 0 lx hasta los 80.000 lx, donde su precisión viene dada por 2%±3 dígitos. Con una resolución de 0,01 lx.

La incertidumbre combinada ( $\mu_C$ ) se calcula a partir del modelo matemático y los componentes de la incertidumbre ya estimados. Para incrementar el nivel de confianza del intervalo dentro del cual se estima se encuentra el valor verdadero del mensurando, la incertidumbre combinada se multiplica por un factor de cobertura k, a ese resultado se le llama incertidumbre expandida ( $\mu_E$ ).

$$\mu_C = \sqrt{\mu_A^2 + \mu_B^2}$$

$$\mu_E = k * \mu_C$$

Finalmente se está en posibilidad de ofrecer un resultado más confiable al reportar de la siguiente manera:

$$Y = \bar{X} \pm \mu_E$$

### Incertidumbres asociadas a los resultados obtenidos en el proceso de medición

Para garantizar un grado de confiabilidad de los resultados dados por las curvas de comportamiento de cada espacio se calculan las incertidumbres asociadas a cada punto de las gráficas, con un grado de confianza del 95,45% con un factor k de 2. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla H.2. Incertidumbres asociadas al aula IE 402, enmallado 15 puntos.

INCERTIDUMBRE [%]							
PUNTO	HORA						
	11:00 am	12:00 m	1:00 pm	2:00 pm	3:00 pm	4:00 pm	5:00 pm
P1	0,005	0,001	0,004	0,008	0,004	0,008	0,008
P2	0,006	0,001	0,004	0,001	0,005	0,009	0,013
P3	0,007	0,003	0,014	0,007	0,0004	0,012	0,020
P4	0,006	0,001	0,004	0,002	0,004	0,011	0,018
P5	0,004	0,008	0,001	0,003	0,002	0,007	0,010
P6	0,001	0,021	0,027	0,002	0,022	0,002	0,018
P7	0,001	0,016	0,018	0,028	0,022	0,027	0,017
P8	0,014	0,013	0,027	0,019	0,028	0,027	0,024
P9	0,003	0,009	0,008	0,012	0,023	0,020	0,020
P10	0,015	0,045	0,005	0,003	0,011	0,016	0,010
P11	0,004	0,001	0,003	0,006	0,002	0,004	0,007
P12	0,006	0,005	0,004	0,0003	0,012	0,006	0,008
P13	0,001	0,008	0,005	0,002	0,003	0,009	0,022
P14	0,004	0,001	0,004	0,001	0,005	0,010	0,007
P15	0,005	0,002	0,005	0,008	0,005	0,004	0,011

Tabla H.3. Incertidumbres asociadas al aula IE 402, enmallado 27 puntos, tubo centro.

INCERTIDUMBRE [%]						
PUNTO	HORA					
	11:00 am	12:00 m	1:00 pm	2:00 pm	3:00 pm	4:00 pm
P1	0,015	0,036	0,012	0,303	0,027	0,013
P2	0,018	0,008	0,012	0,285	0,019	0,012
P3	0,005	0,026	0,008	0,194	0,013	0,006
P4	0,004	0,011	0,005	0,123	0,008	0,020
P5	0,003	0,006	0,001	0,064	0,002	0,010
P6	0,002	0,001	0,003	0,037	0,001	0,008
P7	0,006	0,014	0,013	0,268	0,028	0,016
P8	0,010	0,009	0,011	0,173	0,007	0,013
P9	0,004	0,007	0,004	0,100	0,004	0,021
P10	0,003	0,002	0,0001	0,058	0,003	0,012
P11	0,002	0,001	0,002	0,038	0,004	0,009
P12	0,021	0,025	0,009	0,266	0,022	0,019
P13	0,013	0,008	0,004	0,173	0,012	0,014
P14	0,021	0,001	0,002	0,110	0,001	0,013
P15	0,010	0,003	0,001	0,048	0,003	0,011
P16	0,001	0,001	0,002	0,029	0,003	0,003
P17	0,001	0,001	0,001	0,019	0,003	0,003
P18	0,0003	0,001	0,001	0,013	0,002	0,006
P19	0,001	0,0003	0,002	0,011	0,002	0,005
P20	0,027	0,016	0,003	0,263	0,019	0,026
P21	0,007	0,027	0,013	0,188	0,007	0,019
P22	0,007	0,014	0,006	0,121	0,006	0,017
P23	0,004	0,004	0,003	0,062	0,005	0,009
P24	0,002	0,002	0,002	0,037	0,003	0,002
P25	0,001	0,001	0,001	0,026	0,001	0,003
P26	0,002	0,002	0,0004	0,019	0,003	0,001
P27	0,002	0,002	0,001	0,017	0,002	0,002

Tabla H.4. Incertidumbres asociadas al aula IE 402, enmallado 27 puntos, tubo norte.

INCERTIDUMBRE [%]						
PUNTO	HORA					
	11:00 am	12:00 m	1:00 pm	2:00 pm	3:00 pm	4:00 pm
P1	0,032	0,023	0,017	0,362	0,027	0,016
P2	0,019	0,009	0,0001	0,267	0,014	0,022
P3	0,010	0,010	0,007	0,167	0,008	0,021
P4	0,006	0,011	0,003	0,096	0,004	0,015
P5	0,006	0,007	0,0003	0,065	0,004	0,015
P6	0,004	0,002	0,002	0,043	0,006	0,010
P7	0,023	0,004	0,001	0,261	0,020	0,024
P8	0,031	0,004	0,013	0,184	0,011	0,016
P9	0,015	0,008	0,002	0,117	0,006	0,018
P10	0,006	0,004	0,004	0,072	0,00	0,014

<b>P11</b>	0,0002	0,002	0,001	0,039	0,006	0,006
<b>P12</b>	0,029	0,009	0,007	0,264	0,028	0,026
<b>P13</b>	0,013	0,005	0,008	0,186	0,011	0,024
<b>P14</b>	0,008	0,003	0,016	0,109	0,004	0,025
<b>P15</b>	0,027	0,008	0,0003	0,235	0,023	0,035
<b>P16</b>	0,019	0,020	0,0001	0,158	0,005	0,024
<b>P17</b>	0,017	0,006	0,002	0,096	0,002	0,015
<b>P18</b>	0,010	0,002	0,004	0,051	0,002	0,012
<b>P19</b>	0,007	0,002	0,001	0,026	0,004	0,016
<b>P20</b>	0,003	0,001	0,001	0,016	0,002	0,009
<b>P21</b>	0,002	0,0003	0,001	0,011	0,001	0,007
<b>P22</b>	0,001	0,0003	0,001	0,007	0,001	0,006
<b>P23</b>	0,001	0,0002	0,001	0,005	0,0005	0,004
<b>P24</b>	0,002	0,0002	0,001	0,004	0,001	0,003
<b>P25</b>	0,001	0,00003	0,001	0,004	0,001	0,004
<b>P26</b>	0,001	0,0002	0,001	0,004	0,001	0,003
<b>P27</b>	0,0004	0,0002	0,0005	0,004	0,001	0,004